

# Der Weg zur automatisierten Kapazitätsplanung und Steuerung

Wie die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) einen Fahrplan vollautomatisch berechnen und den Betrieb bis zur Steuerung der Züge automatisieren.

MARCUS VÖLCKER

**Höhere Ansprüche an die Kapazitätsauslastung bedingen einen Ausbau der heutigen Fahrplanplanung, betriebliche Disposition und integrierte Leittechnik. Mit dem Programm smartrail 4.0 entwirft die Schweizer Bahnbranche eine Gesamtarchitektur für die Erschließung des Automatisierungs- und Optimierungspotenzials in den Bereichen Stellwerke, Leittechnik, Fahrzeugarchitektur, Datenfunk und Traffic Management System (TMS). Zusätzlich werden neue technologische Entwicklungen integriert (Lokalisierung und automatische Zugführung). Mit dem Traffic Management System wird an einem integrierten Werkzeug gearbeitet, welches automatische Fahrplanungsprozesse und vollautomatische Betriebsabwicklung miteinander eng verzahnen.**

## Die automatische Fahrplanberechnung

Die SBB verfügen heute über IT-Systeme, die im Bereich der Fahrplanplanung (Kapazitätsplanung), der betrieblichen Disposition sowie der integrierten Leittechnik (Kapazitätssteuerung) eine höchst leistungsfähige Architektur aufweisen. Diese Systeme machen einen guten Anteil an der hohen Pünktlichkeit im laufenden Bahnbetrieb in der Schweiz aus. Insbesondere die präzise Konflikterkennung auf Sicherungsdetailebene im IT-System Rail Control System (RCS) sowie die integrierte Leit- und Sicherungstechnik, die Stellwerksbedienungen abstrahiert und von jedem Arbeitsplatz im SBB-Netz aus zu bedienen ist, haben signifikanten Anteil an der Effizienz im Schweizer Bahnbetrieb. Dennoch stellen höhere Kapazitätsauslastungen Ansprüche, die einen weiteren Ausbau der bestehenden Systeme verlangen. Der Fokus liegt bei diesem Ausbau auf einer vollständigen Automatisierung der Tätigkeiten des Fahrplanplaners und des Betriebsmanagers (Betriebsdisponent und Fahrdienstleiter).

Im TMS beginnt der Prozess bei der automatischen Erzeugung von Jahresfahrplänen, aus Bestellungen der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) und den geplanten Baumaßnahmen. Dafür wurde das Fahrplanmodell auf ein generisches Ressourcenbelegungsmodell umgestellt, welches in einem integralen ersten Schritt Baumaßnahmen, Einschränkungen und Zugfahrten als zeitliche und räumliche Belegung der Ressource Infrastruktur in einem System abbildet.

Erste Grundlage für eine effiziente Optimierung des Ressourcenmodells ist dabei die Abstraktion der Bestellung einer Ressource (z. B. Trassenbestellung eines EVU) durch eine Darstellung als Service Intension (SI). Letztere ist definiert durch früheste Abfahrzeit und späteste Ankunftszeit einer Zugfahrt, ähnlich einem Slot im Flugverkehr.

Die Abkehr von pseudogenauen Sperrzeitreihen (Sicherungsabschnitt Belegung) in der Fahrplanplanung, die aufgrund des langen Planungshorizontes von mehreren Jah-

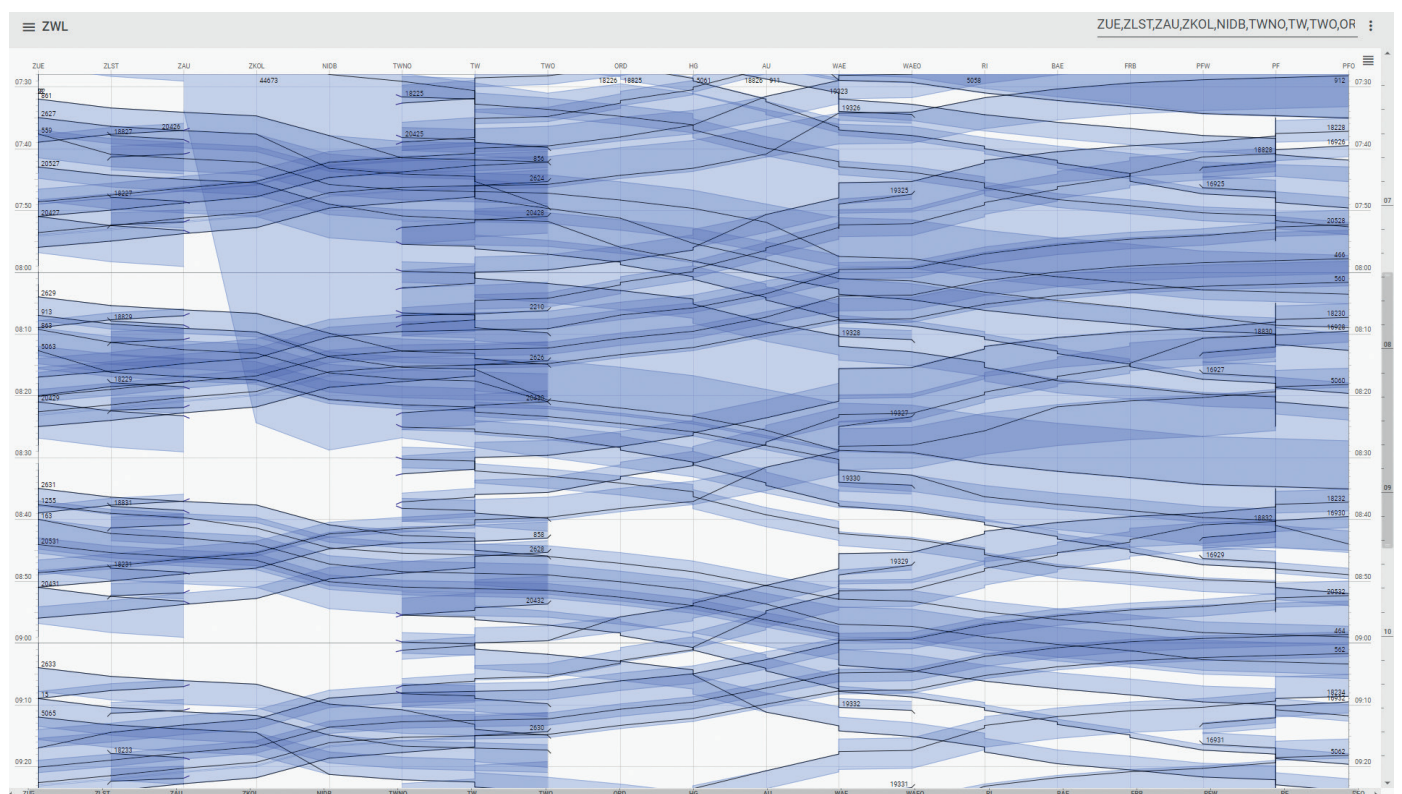


Abb 1.: Slotbasierende Ressourcenmodelle im Fahrplan

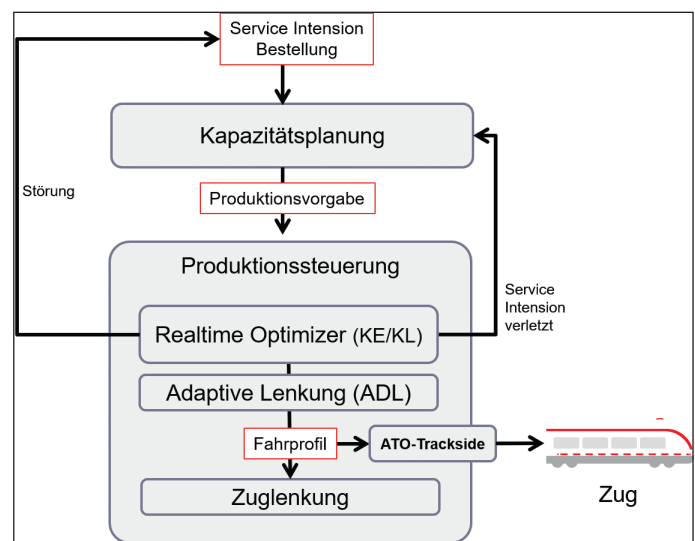
ren nur sehr selten auf der zur Zugfahrt real zur Verfügung stehenden Topologie basieren, ist dabei nur einer der Vorteile des Modells. Mithilfe von Ressourcenbelegungsmodellen (Abb. 1) lassen sich auch die heutigen statischen Fahrplanreserven in Zukunft dynamisch zur Laufzeit verteilen. Ebenfalls lässt sich das Ressourcenbelegungsmodell flexibel an die Genauigkeit der zum Zeitpunkt der Planung vorliegenden Infrastruktur (Schiennetz und Logik in der Sicherungstechnik) anpassen.

So ist es von großer Bedeutung, die notwendige Granularität von Topologieinformationen zum richtigen Zeitpunkt in der Fahrplanplanung zu verwenden. Der Versuch, bereits zwei Jahre vor Inbetriebnahme von Infrastruktur exakte mikro-topologische Informationen zur Fahrplangestaltung zu besitzen, scheitert an den verschiedenen Bauprozessphasen einer Bahninfrastruktur. Dennoch sind unzulässige Vereinfachungen, die geplante Baustellen oder Langsamfahrstellen nicht oder nur grob berücksichtigen, oft der Grund für eine Fahrplanplanung, die später im Betrieb nicht umgesetzt werden kann und zu erheblichen Verspätungen führt. Es ist aus diesem Grund auch entscheidend, im gesamten Fahrplanentstehungsprozess und der anschließenden Betriebsabwicklung durchgängige Topologiemodelle zu verwenden, deren Feinheit an Informationen entlang der Dauer des Prozesses immer weiter zunimmt. Diese Zunahme an exakter Infrastruktur-Topologieinformation führt jedoch in der Praxis zu einem kontinuierlichen Anpassungsprozess im Fahrplan, da bei jeder Planänderung von Baumaßnahmen oder auftretenden Konflikten bei Zugfahrten oder veränderten Zugeigenschaften (Länge, Gewicht) der Fahrplan anzupassen ist. Es ergibt sich damit ein kontinuierlicher Planungsprozess, der nur mit geeigneten Automaten und rechnergestützter Fahrplankonstruktion automatisch erfolgen kann.

### Künstliche Intelligenz unterstützt im Planungsprozess

Die Anwendung geeigneter mathematischer Verfahren zur Optimierung des Ressourcenbelegungsmodells im Fahrplan stößt wegen der rasch explodierenden Lösungsmenge an unlösbare Rechenzeitprobleme. Die Komplexität des mathematisch NP-schweren (NP=nichtdeterministische Polynomialzeit) [1] Problems ist auch mit zukünftigen Rechnerleistungen nicht in brauchbarer Zeit zu lösen. Innerhalb der Kapazitätsplanung des TMS von smartrail 4.0 kommen daher zwei Ansätze für die Lösung des Problems parallel zum Einsatz: Zum einen sind dies Reinforcement-Learning-Methoden [2] aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz und zum anderen sind es klassische Methoden aus der Mathematik zum Lösen komplexer linearer Gleichungssysteme.

**Abb 2.:** Automatischer Informationsfluss im TMS



Eine spezialisierte „Deep Learning“-Hardware [3] errechnet unter Einsatz großer Rechnerkapazitäten in wenigen Sekunden Fahrpläne, welche über spezielle Bewertungskriterien dann zur Schulung eines neuronalen Netzwerkes dienen. Mithilfe dieser schnellen Fahrplansimulation und mit der geeigneten Methodik, ein neuronales Computernetz zu füttern, werden die Entscheidungsprozesse des menschlichen Fahrplanplaners nachempfunden. Diese dienen zunächst dazu, die Güte eines automatisch errechneten Fahrplanes zu bewerten und können später einmal dazu dienen, geeignete Fahrpläne selbst zu entwickeln.

Der zweite Ansatz ist der Einsatz mathematischer Verfahren zur exakten, konfliktfrei optimalen Berechnung des Fahrplans. Aktuell werden im Programm smartrail 4.0 gleichzeitig verschiedene Verfahren erprobt. Die eingesetzten Verfahren reichen dabei von „Constraint programming“-Techniken [4] über regelbasierte Baumsuch-Algorithmen bis hin zu „Answer Set Programming (ASP)“-Methoden [5] aus der künstlichen Intelligenz.

Weitere mathematische Lösungsansätze, wie ganzzahlig lineare Optimierung ([6] MILP) und genetische Algorithmen [7], wurden wegen zu geringer Skalierungsfähigkeit bereits verworfen.

Unter Anwendung der genannten mathematischen Methoden konnte ein konfliktfreier Fahrplan in effizienter Zeitspanne berechnet werden. Dieser automatisch erzeugte Fahrplan berücksichtigt dabei – neben der Konfliktfreiheit – auch entsprechende Einschränkungen, wie betriebliche Halte sowie Formationsänderungen im Knoten (Auf- und Wegstellungen/Umläufe).

### Vom Fahrplan direkt in die Zugsteuerung

Eine weitere Hürde nach der automatischen und kontinuierlichen Neuberechnung des Fahrplanes ist die immer noch statisch existierende Schnittstelle zum Bahnbetrieb. Nicht selten wird der Fahrplan im Betrieb überarbeitet und um wichtige Bedingungen und

Zusatzleistungen im Knoten (Bahnhofsanlage) erweitert und ergänzt.

Der permanent und kontinuierlich errechnete Fahrplan wird nicht mehr mittels komplexer Schnittstellen an die Betriebs-IT-Systeme übergeben, sondern wird integral und kontinuierlich vom Produktionssteuerungssystem (RCS) übernommen und umgesetzt (Abb. 2).

Aufgrund der Tatsache, dass es durch vielfache Umstände und Störungen im laufenden Betrieb zu Abweichungen (z. B. Verspätungen) kommt, hat das Produktionssteuerungssystem die Aufgabe, im Rahmen der vorgegebenen Slots (Service Intension) aus dem Planungsprozess, das System im laufenden Betrieb stabil zu halten.

Dafür setzt es ähnliche Algorithmen zur Laufzeit ein wie das Planungssystem. Diese basieren ebenfalls auf „Constraint Programming“-Techniken. Zur Laufzeit sind jedoch Antwortzeiten von kleiner 2 Sekunden für eine automatische Konfliktlösung gefordert, die, anders als beim Planungsprozess, auf der tiefsten mikroskopischen Ebene der Topologie (Stellwerkslogik) zu erfolgen haben. Der in Abb. 2 schematisch dargestellte Informationsfluss geschieht im neuen TMS von smartrail 4.0 kontinuierlich und vollautomatisch bis hinunter auf die Steuerungs- und Sicherungsebene.

Die bereits im Einsatz befindlichen automatischen Konfliktlösungsalgorithmen in der Schweiz, die z. B. beim Gotthard-Basistunnel Einsatz finden, wurden im Laufe der Entwicklungen von smartrail 4.0 um die Skalierbarkeit auf das gesamte Schweizer Schiennetz hin erweitert.

Durch Zerlegung in geographische Teilgebiete und geeignete übergeordnete Synchronisationsmechanismen konnte eine massive Parallelisierung des gesamten mathematischen Problems erreicht werden. Diese Parallelisierung wird es ermöglichen, die geforderten Rechenzeiten von wenigen Sekunden zur automatischen Konfliktlösung für das gesamte Netz der Schweiz zu gewährleisten.

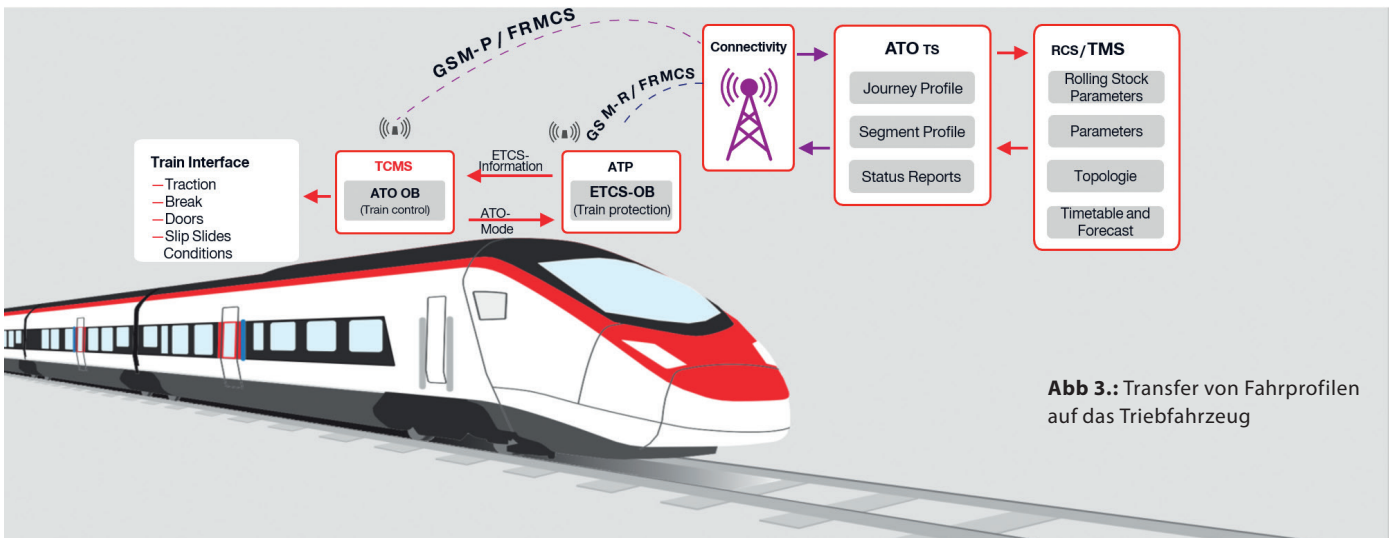


Abb 3.: Transfer von Fahrprofilen auf das Triebfahrzeug

Die Aktionen, die normalerweise im Betrieb von Fahrdienstleitern und Disponenten durchgeführt werden, wie Reihenfolge-, Umleitungs- und Haltedispositionen, werden dabei von der Konfliktlösung automatisch ausgeführt.

**Züge fahren automatisch und verhalten sich energieoptimal**

Das Produktionssteuerungssystem (RCS) erzeugt automatisch eine energieoptimale, konfliktfreie Produktionsvorgabe (PV) (Abb. 3), die an die Lenkungs- und Sicherungsebene sowie gleichzeitig über standardisierte Ausgabekanäle (UNISIG) an das Triebfahrzeug übermittelt wird. Die Produktionsvorgabe (PV) wird kontinuierlich zur Laufzeit, je nach aktueller Betriebssituation, angepasst und versendet.

Die Produktionsvorgabe (PV) wird kontinuierlich zur Laufzeit, je nach aktueller Betriebssituation, angepasst und versendet.

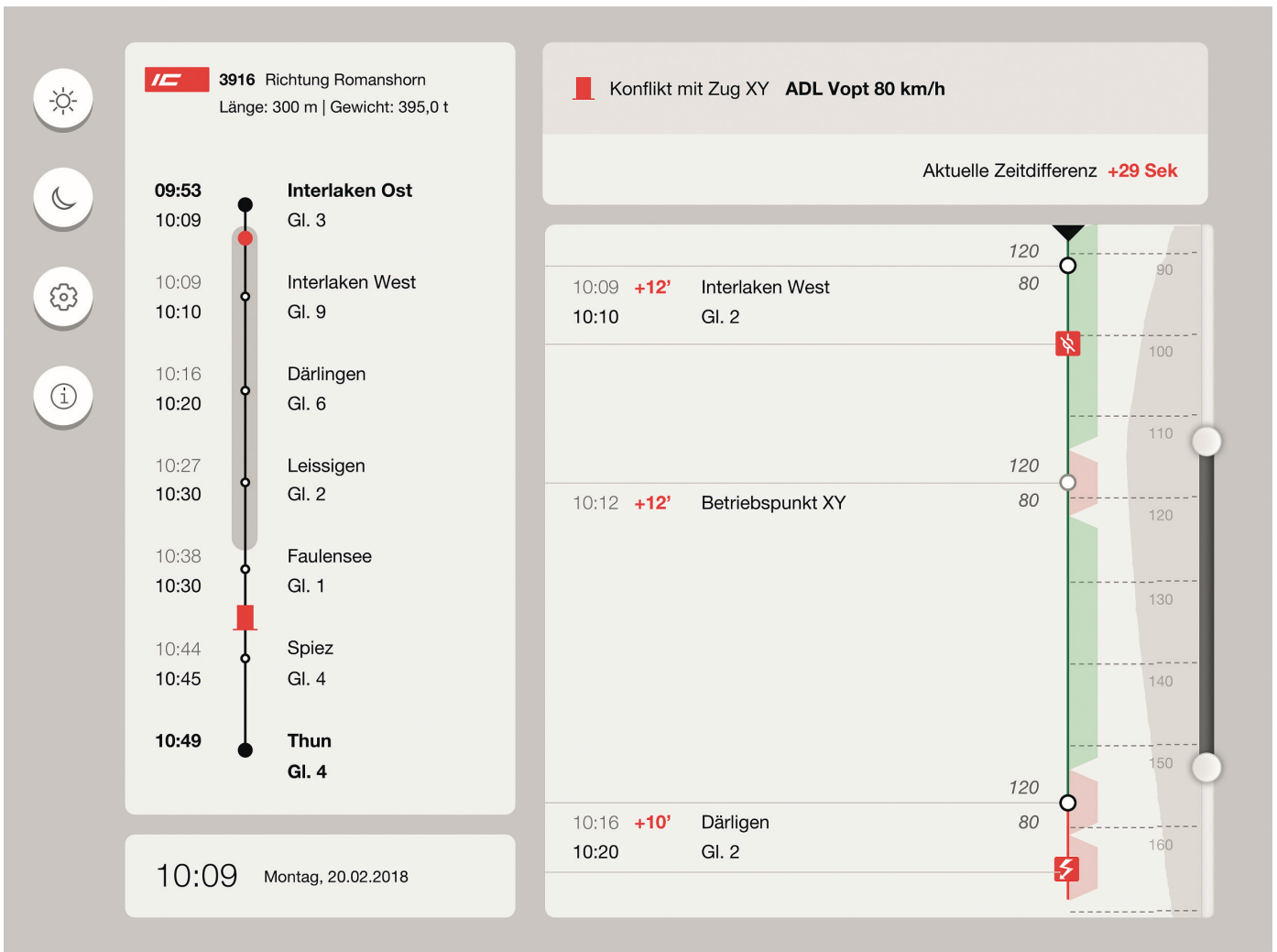


Abb 4.: Anzeige Produktionsvorgabe im Führerstand

Die Zugprognose im System basiert auf einem Event-Constraint-Modell und berechnet innerhalb einer Sekunde die gegenseitige Beeinflussung aller auf dem Netz fahrenden Züge kontinuierlich. Automatische Algorithmen zur Konfliktlösung sind ebenfalls kontinuierliche Rechenprozesse, welche das Netz zur Laufzeit in dem gegebenen Rahmen der verkauften Service Intension (SI) automatisch optimieren (siehe Abb. 3 und Abb. 2).

Die Produktionsvorgabe ist dabei ein energieoptimales Fahrprofil, welches im System Adaptive Lenkung (ADL) berechnet wird (siehe *EI* 11/2018 S. 20 ff.). Dieses energieoptimale Fahrprofil wird dann entweder mit Geschwindigkeitsvorgaben an den Triebfahrzeugfahrer versendet oder direkt an das Triebfahrzeug, gemäß internationaler Spezifikationen für Automatic Train Operation (ATO) – Grade of Automation Level 2 (GOA2),

Die Anzeige der energieoptimalen, konfliktfreien Produktionsvorgabe wird im Führerstand entweder in einer speziellen App auf einem mobilen Tablet angezeigt und vom Triebfahrzeugführer umgesetzt oder es gelangt als GOA-2-Timing-Point-Profil direkt auf das Triebfahrzeug (Abb. 4). Dort wird dieses automatisch ohne Handhabe des Triebfahrzeugführers ausgeführt (ATO GOA-2).

Zusammenfassend wird mit dem TMS von smartrail 4.0 für die Schweizer Bahnbranche ein noch weiter integriertes Werkzeug geschaffen, welches automatischen Fahrplanungsprozess und vollautomatische Betriebsabwicklung miteinander eng verzahnt.

### Voraussetzungen zur erfolgreichen Ausführung

Der Schlüssel zum Erfolg der automatischen Kapazitätsplanung und -steuerung hängt von mehreren Faktoren ab:

Erstens ist eine sinnvolle Zerlegung des gesamten Problems in mehrere Teilprobleme notwendig. Diese Teilproblemzerlegung orientiert sich an den Dimensionen „geographisches Gebiet“ sowie an der „Granularität“ der verwendeten Topologie des Schienen-

netzes. Andernfalls können die mathematischen Probleme aufgrund des exponentiell anwachsenden Lösungsraumes nicht in nützlicher Zeit berechnet werden.

Gerade im Bereich der Granularität der Topologie scheiden sich oft die Geister in der Bahntechnikwelt. Zum einen wird gefordert, dass sich ein valider Fahrplan nur bei Berücksichtigung von höchst genauer Topologieinformation berechnen lässt, zum anderen existiert diese in valider Form oft gar nicht zum Zeitpunkt der Fahrplangebarung. Eine einheitliche Topologiebasis, die die gleichen Modellreferenzen benutzt sowie eine Granularität, die stetig erhöht werden kann, sind Schlüsselfaktoren. Neben den zum Teil sehr aufwendigen, mathematischen Verfahren zur vollautomatischen Berechnung von Fahrplänen (Kapazitätsplanung) und der durchgehenden, automatischen Disposition von Zügen im Live-Betrieb (Kapazitätssteuerung) sind auch erhebliche Anpassungen an die Arbeitsprozesse von Planern, Disponenten und Fahrdienstleitern notwendig.

### Durchgehende Prozesse sind notwendig

Es macht wenig Sinn, Teilarbeitsprozesse im gesamten Produktionssystem getrennt zu betrachten. Für eine durchgängig funktionierende Planung und deren Umsetzung ist eine ganzheitliche Berücksichtigung aller am Prozess beteiligten Partner notwendig (EVU, Planung, Betrieb). Es ergibt keinen Mehrwert, spezifische Fahrpläne für EVU-Bedürfnisse zu berechnen oder energieoptimales Zugfahren nicht für alle auf dem Netz gleichzeitig fahrenden EVU zur Verfügung zu stellen. Auch in der parallelen Beeinflussung von Baumaßnahmen, Unterhaltsmaßnahmen und Zugfahrten liegt ein notwendiges Integrationspotenzial. Nur wenn alle am Prozess beteiligten Partner an der Qualität des Gesamtproduktes arbeiten, ergibt sich – neben der notwendigen Technik und Algorithmen – ein erfolgreiches Ergebnis.

Denn eine vollautomatische Technologie kann auch nur dann erfolgreich sein, wenn die beteiligten Prozesspartner behindernde Barrieren in Form von Vorschriften und Regulierungen aufweichen und Bereiche nicht künstlich voneinander abgrenzen, sondern Nutzen für ein qualitativ hochwertiges Produkt spenden.

### Zusammenarbeit mit anderen Bahnen

Das heute zugrundeliegende System RCS wird auch außerhalb der Schweiz eingesetzt. Im Programm smartrail 4.0 setzt man generell auf eine internationale Anwendbarkeit und verfolgt das Ziel, die Systeme mit anderen Infrastrukturbetreibern zu teilen, dafür werden wichtige Ergebnisse laufend offengelegt (siehe [www.smartrail40.ch](http://www.smartrail40.ch)). Darüber hinaus haben über zehn Bahnen mit der RCA [8] (reference CCS architecture) eine gemeinsame Initiative zur Standardisierung wichtiger Schnittstellen (inklusive TMS) im Gesamtsystem der Bahnproduktion lanciert. ■

### QUELLEN

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/NP-Schwere> 22.01.2019 20:51
- [2] <https://www.statworx.com/ch/blog/einfuehrung-in-reinforcement-learning-wenn-maschinen-wie-menschen-lernen/> 22.01.2019 20:52
- [3] <https://www.nvidia.com/de-de/deep-learning-ai/> 22.01.2019 20:51
- [4] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743106694900337> 22.01.2019 20:52
- [5] <https://www.cs.uni-potsdam.de/~torsten/asp/> 22.01.2019 20:53
- [6] <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/lexikon/technologien-methoden/Operations-Research/Mathematische-Optimierung/Ganzzahlige-Optimierung> 22.01.2019 20:54
- [7] <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/technologien-methoden/Operations-Research/Metaheuristik/Evolutionarer-Algorithmus> 22.01.2019 20:54
- [8] [https://ertms.be/workgroups/ccs\\_architecture](https://ertms.be/workgroups/ccs_architecture) 22.01.2019 19:42



### Dipl.-Ing. Marcus Völcker

Geschäftsführer mtrail GmbH Schweiz  
 Leiter Roadmap & Strategie TMS  
 smartrail 4.0, CH-Bern  
[marcus.voelcker@mtrail.ch](mailto:marcus.voelcker@mtrail.ch)