

# Digitale Schiene Deutschland – Zukunftstechnologien für das Bahnsystem

*Achim Fiack, Franziska Weller, Moritz Heimes und Thomas Laux*

## 1 Die Digitalisierung des Bahnbetriebs

Das Eisenbahnsystem ist eine der wichtigsten Säulen für die Verkehrswende, denn schon jetzt ist die Schiene das umweltfreundlichste Verkehrsmittel. Zukünftig werden wesentlich mehr Züge im Schienennetz unterwegs sein – sowohl im Personen- als auch im Schienengüterverkehr. So sollen bis zum Jahr 2030 doppelt so viele Reisende im Fernverkehr und 1 Mrd. mehr Reisende im Nahverkehr die Schiene nutzen, und auch der Güterverkehr soll seinen Marktanteil von aktuell 18,5 % auf 25 % steigern. Doch um einen attraktiveren Bahnverkehr mit mehr Zügen in einer höheren Qualität auf dem Schienennetz zu etablieren, muss die Leistungsfähigkeit des Systems signifikant gesteigert und die Eisenbahn grundlegend modernisiert werden. Da Neubaukapazitäten nur noch beschränkt möglich sind und viel Zeit in Anspruch nehmen, ist die konsequente Digitalisierung und Automatisierung des bestehenden Systems durch tiefgreifende technologische Innovationen der entscheidende Hebel. Das ist die Aufgabe der Sektorinitiative Digitale Schiene Deutschland (DSD).

Das Fundament für die Digitalisierung wird mit der grundlegenden Modernisierung der Infrastruktur durch den Roll-out des „European Train Control System“ in der Ausprägung „Level 2 ohne Signale“ (ETCS L2oS) und durch Digitale Stellwerke (DSTW) gelegt. Der erste Beitrag dieser Reihe konzentrierte sich auf diese erste Stufe der Digitalisierung und die damit verbundenen Auswirkungen auf Kapazität und Betriebsqualität im Schienenverkehr (erschieden im EIK 2022 [1]). Darauf aufbauend, arbeitet die DSD am vollständig digitalisierten Bahnsystem, in dem der Netz- und Fahrbetrieb weitgehend digitalisiert und automatisiert ist. Die Grundlagen eines durchgehend digitalen Bahnsystems und die wesentlichen Handlungsfelder sowie Wege hin zur Realisierung mit ersten Prototypenprojekten und Anwendungsfällen wurden im zweiten Beitrag dieser Reihe dargestellt (erschieden im EIK 2023 [2]).

Dieser dritte Beitrag knüpft daran an. Im ersten Teil wird nach einem Überblick über die Systemarchitektur das aktuelle Technologieportfolio der DSD dargestellt (Kap. 2-3). Das Spektrum umfasst das vollautomatisierte Fahren mit intelligenter Sensorik zur

Erfassung von Umfeld und Hindernissen. Es erstreckt sich weiter über ein KI-basiertes (KI – Künstliche Intelligenz) Verkehrs- und Kapazitätsmanagementsystem für Fahrplanung und Disposition bis hin zu einer neuen, zugzentrierten Fahrwegsicherung und Zugbeeinflussung, welche u.a. das Lösen von fixen Blockabschnitten und ein Fahren in flexiblen Abständen (Moving Block) erlaubt. In Kapitel 4 wird die daraus entwickelte Roll-out-Systematik dargestellt und ein Überblick zum aktuellen Status des Roll-outs gegeben.

Die DSD arbeitet von Beginn an nach folgenden Grundprinzipien:

1. In einer Systemarchitektur wird detailliert festgelegt, was einzelne Komponenten des Bahnsystems leisten müssen und wie sie zusammenarbeiten sollen.
2. In gemeinsamen Prototypen- und Pilotprojekten mit Industriepartnern werden parallel dazu die Anforderungen aus der Systemarchitektur validiert und neue Technologien für den Einsatz im Bahnsystem erprobt.
3. Die neuen Ansätze aus Systemarchitektur und Technologien werden intensiv in europäische Gremien eingebracht und mit anderen Bahnbetreibern weiterentwickelt. Dadurch wird von Beginn an ein standardisierter und harmonisierter digitaler Bahnbetrieb europaweit sichergestellt.

## 2 Die Systemarchitektur des Digitalen Bahnsystems

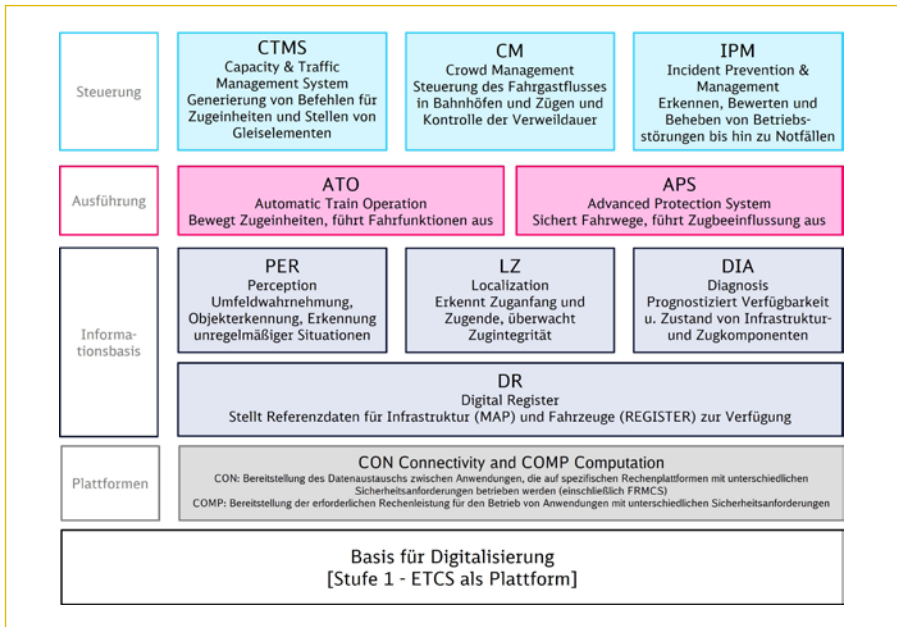
Um eine vollständige Digitalisierung und Automatisierung des Systems zu erreichen, ist ein systematischer, ganzheitlicher Ansatz erforderlich. Auf betrieblicher Ebene sind die Zusammenhänge des komplexen Bahnsystems zu erfassen und zu analysieren. Die weitgehende Abstrahierung von der technischen Lösung schafft Unabhängigkeit und Offenheit für den Technologieeinsatz. Risiken, die die Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (Safety und Security) bedrohen, müssen analysiert und im digitalen ebenso wie im heutigen Bahnsystem beherrscht werden.

Daher war es notwendig, sich von den gewachsenen Systemen, Schnittstellen und Regeln des bestehenden Systems zu lösen und eine übergreifende, neue Systemarchitektur für ein Digitales Bahnsystem zu entwickeln, welche für eine nutzenorientierte Technologieentwicklung von Vorteil ist. Da dieses systematische Vorgehen mit textuellen Methoden nicht beherrschbar ist, wurde ein Vorgehen nach den Methoden des „Modellbasierten Systems Engineering (MBSE)“ gewählt, welches aus großen System-Engineering-Vorhaben bekannt ist. Für die Systembeschreibung wurden dabei drei grundlegende Designrichtlinien festgelegt:

- möglichst vollständige Automatisierbarkeit und Simulierbarkeit als Grundlage für Validierungs-, Verifikations- und Integrationstests
- möglichst vollständige Modularisierbarkeit und Standardisierbarkeit
- Kapselung sicherheitsrelevanter von nicht sicherheitsrelevanten Funktionen

Damit wurde eine modellbasierte Referenzarchitektur entworfen, die im Sinne eines konfigurierbaren Baukastens als Grundlage für Projekte (von Prototypen über Piloten bis zum Serien-Roll-out) dient. Abb. 1 zeigt den aktuellen Entwicklungsstand der schematischen Referenzarchitektur und beschreibt die Funktionsbereiche des Digitalen Bahnsystems.

Aufbauend auf Stufe 1 (ETCS als Plattform) sind für die vollständige Digitalisierung des Bahnsystems nach aktuellem Stand zehn funktionale Cluster notwendig, die sich in vier Ebenen unterteilen:



**Abb. 1:** Schematische Referenzarchitektur und Funktionsbereiche des Digitalen Bahnsystems

### Plattformen

Neue digitale Bahnapplikationen brauchen für ihren Betrieb hochleistungsfähige IT/TK-Plattformen. Im Vergleich zum heutigen Bahnbetrieb führen neue Anwendungsfälle zu erheblich höheren Anforderungen an die Konnektivität sowie an die Verarbeitung großer Datenmengen in Echtzeit. Hochperformante Konnektivität (CON) sowie leistungsfähige und skalierbare Datenverarbeitungsinfrastrukturen (COMP) sind – auch vor dem Hintergrund unterschiedlicher Sicherheitsanforderungen – daher wichtige Basisfunktionalitäten eines digitalisierten Bahnsystems.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Digitale Schiene Deutschland /  
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten  
 genehmigt / © DVV Media Group GmbH

Digitalisierung erfordert zudem eine systematische Erzeugung und Bereitstellung von Daten, um z. B. KI, die zukünftig in vielen Anwendungsfällen eine entscheidende Rolle spielen wird, ausreichend „trainieren“ zu können. Dazu braucht es eine sogenannte „Data-Factory“, die große Mengen notwendiger Daten u. a. für das „Training“ von KI-Software systematisch generiert und gezielt bereitstellt. Dafür wird eine Infrastruktur aus State-of-the-Art IT-Plattformen mit sehr großen Speichereinheiten und Hochleistungsrechnern benötigt.

### Informationsbasis

Ein hoher Grad an Automatisierung geht einher mit einer deutlichen Ausweitung der Informationsbasis. Zum einen erheben digitalisierte Systeme mehr Daten in höherer Frequenz. Im digitalen Bahnbetrieb sind dies insbesondere Daten zur Umfeld- und Hinderniserkennung (PER), zur hochgenauen Ortung von Zügen (LZ) sowie verschiedenste Diagnosedaten von Infrastruktur- und Zugkomponenten (DIA). Zum anderen benötigen digitale Systeme hochgenaue, reale Referenzdaten, mit denen die erhobenen Daten abgeglichen werden können. Dies ist Aufgabe des Digitalen Registers (DR), einer einheitlichen Datenbasis für Realdaten über Infrastruktur und Fahrzeuge.

### Ausführung

Anfahren, beschleunigen, bremsen, anhalten, Türen öffnen und schließen – all das werden Züge zukünftig selbstständig durchführen. Das ist die Aufgabe des Systems Automatic Train Operation (ATO). Neben dem Ziel des vollautomatisierten Fahrens mit Umfeld- und Hinderniserkennung gehört dazu auch das Auf- und Abrüsten von Triebfahrzeugen (Tfz) sowie die Durchführung sämtlicher weiterer Fahrfunktionen. Das Digitale Bahnsystem der Zukunft wird außerdem über einen sehr weitgehend automatisierten Betrieb der Infrastruktur verfügen. Dies ist die Aufgabe des Advanced Protection Systems (APS), welches den Weg der konsequenten Digitalisierung der Leit- und Sicherungstechnik (LST) fortführt. Dazu gehört die Sicherung des Fahrwegs – z. B. das korrekte Stellen von Weichen und Fahrstraßen, was heute oft noch „analoge“ Stellwerke (Stw) übernehmen (Relaisstellwerke, mechanische Stw) – sowie die Zugbeeinflussung auf Basis des ETCS. Letztere stellt sicher, dass Geschwindigkeitsbeschränkungen nicht überschritten werden und greift bei Abweichungen automatisch ein.

### Steuerung

Im dichten Verkehr entstehen immer wieder Störungen. Auf diese muss reagiert werden, da sie sich sonst wie eine Kettenreaktion ausbreiten. Diese Korrekturen werden heute weitgehend manuell durchgeführt. Im zukünftigen, noch dichteren Verkehr

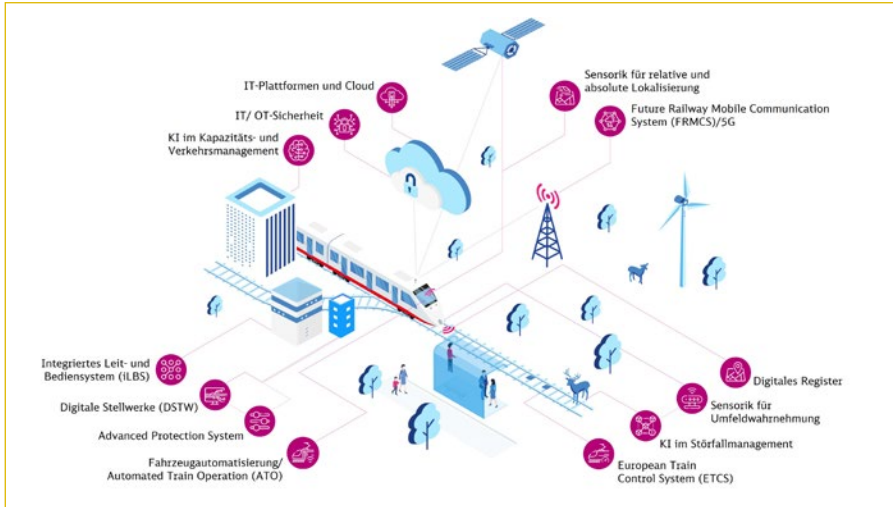
ist das nicht mehr möglich. Entscheidungen müssen in kurzen Abständen schnell und vorausschauend getroffen werden. Die in Echtzeit generierten Daten im Betrieb werden dazu verschiedenen Steuerungssystemen übermittelt, deren Aufgabe es ist, die Daten zu analysieren und optimale Entscheidungen für die verkehrliche Situation zu treffen. Das Kapazitäts- und Verkehrsmanagementsystem (CTMS) hat dabei die Aufgabe, automatisiert neue Betriebspläne (insb. Trassenbelegung, Fahrzeug-/Personaleinsatz) zu erstellen und daraus Befehle für Zügeinheiten und das Stellen von Gleiselementen zu generieren, um den täglichen Betrieb zu steuern und zu optimieren. Das Crowd Management (CM) steuert den Fahrgastfluss, z. B. in Bahnhöfen. Das Störfallmanagement obliegt dem Incident Prevention and Management (IPM). Auf Basis der Echtzeitinformation aus z. B. irregulären Vorfällen im täglichen Betrieb muss hier die Situation erkannt, bewertet, behoben und ggf. auch das Notfallmanagement eingeleitet werden.

### 3 Die Zukunftstechnologien des Digitalen Bahnsystems

Die Systemarchitektur ist technologieoffen und macht keine Vorschriften zur technologischen Umsetzung der oben beschriebenen Funktionsbereiche. Das zweite Grundprinzip der DSD – die schnelle Validierung der Funktionen eines Digitalen Bahnsystems mit der Industrie im Rahmen von Pilotprojekten – braucht aber eine technische Basis. Für einige Funktionsbereiche konnte und kann auf Technologien zurückgegriffen werden, die z. B.

- aktuell am Markt für den Bahnsektor bereits verfügbar sind,
- sich noch im Entwicklungsstadium befinden, aber erprobt werden können,
- in anderen Branchen (Automotive, IT/TK, KI) eingesetzt werden und auf das Bahnsystem angepasst werden müssen.

Für andere, sehr bahnspezifische Funktionsbereiche, wie z. B. CTMS, musste die Technologieentwicklung erst angestoßen werden. Während die Referenzarchitektur mit ihren Funktionsbereichen weitgehend stabil bleiben soll, hängt die technische Basis vom technologischen Fortschritt ab und wird sich mit der Zeit verändern. Nach fünf Jahren Erfahrung mit zahlreichen Erprobungen sowie intensiver Zusammenarbeit mit Industriepartnern hat sich ein Technologieportfolio herauskristallisiert, das in Abb. 2 schematisch und vereinfacht dargestellt ist. Mit dem Portfolio können fast alle Funktionsbereiche des digitalen Bahnbetriebs in der Praxis erprobt bzw. pilotiert werden. Das aktuelle Portfolio umfasst aktuell 13 Technologiefelder – z. T. gleichnamig mit den oben vorgestellten Funktionsbereichen –, die anschließend beschrieben werden (die Technologiecluster European Train Control System ETCS, Digitale Stellwerke DSTW, Integriertes Leit- und Bediensystem iLBS bilden die erste Stufe der Digitalisierung und wurden in [1] beschrieben).



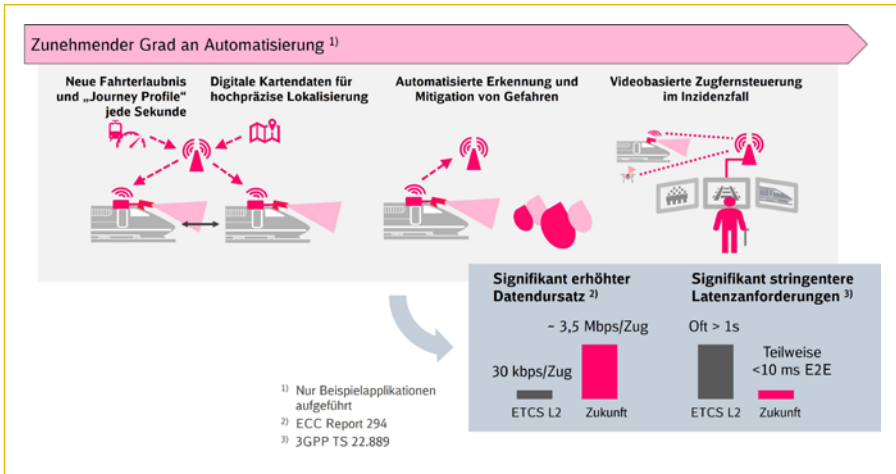
**Abb. 2:** Vereinfachte, schematische Darstellung des aktuellen Technologieportfolios der Digitalen Schiene Deutschland

### 3.1 IT-Plattformen & Cloud und IT/OT-Sicherheit

Die technologische Umsetzung des Funktionsbereichs COMP fußt auf neuen, hochleistungsfähigen IT-Hard- und Softwareplattformen. Diese können große Datenmengen in Echtzeit bei gleichzeitig sehr hohen funktionalen Sicherheitsanforderungen verarbeiten. Ein wichtiger Grundsatz dabei ist die standardisierte Trennung von Applikationen und IT-Plattformen. In Kollaboration mit Partnern wird intensiv an einer „Safe Computing Plattform“ gearbeitet. Sie erlaubt Applikationen und Plattformen unterschiedlicher Hersteller und erfüllt gleichzeitig die hohen Sicherheitsanforderungen von kritischen Bahnapplikationen (bis SIL4). „Private Cloud“-ähnliche Rechenzentren, in Kombination mit Cloudlösungen und neuen IT-Plattformen im Zug stehen dabei im Fokus.

### 3.2 Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) / 5G

Die technologische Umsetzung der Datenübertragung fußt auf dem neuen, 5G-basierten Bahnfunkstandard FRMCS (Future Railway Mobile Communication System). Er kann die Anforderungen für eine hochperformante, drahtlose Echtzeitkommunikation digitaler Bahnapplikationen erfüllen. Es wird davon ausgegangen, dass die durchschnittlich erforderliche Datenrate um zwei Größenordnungen auf mehrere Mbit/s je Zug ansteigen wird und Latenzzeiten (Reaktionszeiten), insbesondere im Zusammenhang mit dem vollautomatisierten Fahren, im Bereich von 10 ms erforderlich sind (Abb. 3, zum Vergleich: heute sind Reaktionszeiten von oft > 1 s üblich).



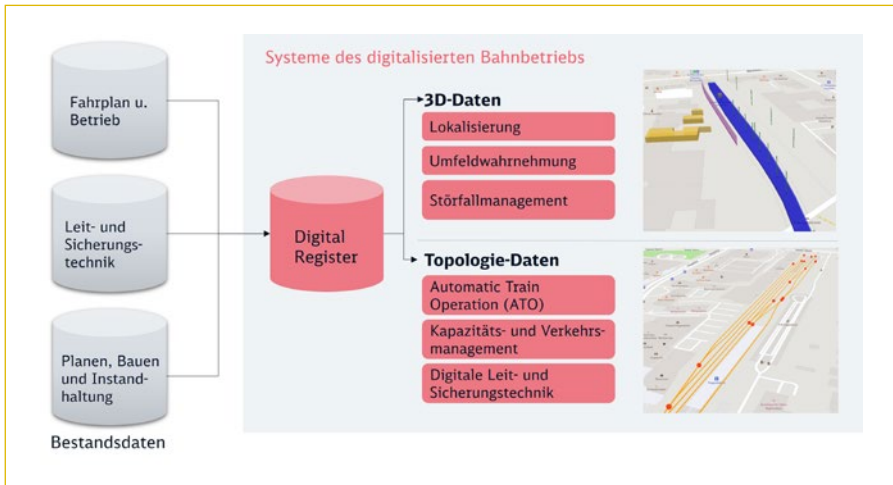
**Abb. 3:** Neue, digitale Bahnapplikationen haben deutlich höhere Anforderungen an drahtlose Konnektivität zwischen Zug und Strecke.

Da der aktuelle Bahnfunkstandard GSM-R (Global System for Mobile Communications – Rail) den Anforderungen des zukünftigen Bahnsystems nicht mehr gerecht werden kann, wird dieser perspektivisch durch FRMCS ersetzt. Dazu hat die Europäische Kommission dem Eisenbahnsektor zusätzliche 10 MHz-Frequenzspektrum im 1900 MHz-Bereich zugeteilt. Das Design von FRMCS folgt zwei wichtigen Leitplanken: Zum einen der Entkopplung der Kommunikationsfunktionen der Plattformen von bahnspezifischen Applikationen und zum anderen der maximalen Nutzung von standardisierten, handelsüblichen Komponenten. Der erste Aspekt stellt sicher, dass bei unterschiedlichen Lebenszyklen von Anwendungen und Plattformen beide Systeme weitgehend unabhängig voneinander aufgerüstet werden können. Der zweite Aspekt ermöglicht eine kosteneffiziente, zug- und infrastruktureseitige FRMCS-Ausrüstung, da Standardkomponenten verwendet werden, die auch in anderen Branchen zum Einsatz kommen. Technisch setzt sich FRMCS aus dem sogenannten „Transport Stratum“ und dem „Service Stratum“ zusammen. Das Transport Stratum wird aktuell über 5G Standalone realisiert und bildet die Übertragungsebene für das Service Stratum, welches mit dem 3GPP Mission Critical Services (MCx) Framework umgesetzt wird. Das MCx Framework bietet wesentliche Funktionalitäten für kritische Anwendungen wie Authentifizierung, Punkt zu Punkt Voice, Gruppenkommunikation und Daten- und Videoübertragung. Diese sind für aktuelle sowie zukünftige Bahnapplikationen erforderlich, so z. B. für das automatisierte Fahren oder ein KI-basiertes Verkehrsmanagement.

### 3.3 Digitales Register

Die Daten des Digitalen Registers (DR) lassen sich grob in 3D- und Topologie-Daten gliedern. Die 3D-Daten beschreiben hochgenau lokalisierte Objekte wie Gleisachsen, Bahnsteige, Oberleitungsmasten, Schilder etc. Sie werden als vereinfachte 3D-Objekte gespeichert und durch unterschiedliche Attribute detailliert beschrieben. Die Topologie-Daten beschreiben auf höchster Ebene die logischen Verbindungen von Gleiselementen. Dazu zählen z.B. die Verbindungen von Weichen untereinander oder zwischen Weichen und Gleisabschlüssen, welche mit Daten relevanter Infrastrukturelemente (z. B. Bahnübergänge) und betrieblichen Infrastrukturdaten (z. B. Geschwindigkeitsprofile) ergänzt werden.

Technisch werden die 3D-Daten durch hochgenau vermessene LiDAR-Punktwolken erzeugt, die relevante Objekte im dreidimensionalen Raum „scannen“. Hinter der an Messfahrzeugen angebrachten LiDAR-Technologie stecken im Wesentlichen Laser, die die Umgebung „abtasten“. Anschließend werden die detektierten Objekte klassifiziert, präzisiert und „gelabelt“, also identifiziert und markiert. Diese gelabelten Bereiche der Punktwolke wandern in das DR. Die erhobenen 3D-Objekte dienen wiederum als Grundlage für die Erstellung von hochauflösenden, zentimetergenauen Digitalen Karten, wie sie z. B. für hoch- und vollautomatisiertes Fahren und die Ortung von Zügen benötigt werden (Abb. 4).



**Abb. 4:** Das Digitale Register als zentrale Datendrehscheibe

### 3.4 Sensorik für Umfeldwahrnehmung

Im Fokus dieses Technologiefeldes steht die Umfeldwahrnehmung und Objekterkennung (Funktionsbereich PER) durch das Tzf. Die technische Realisierung erfolgt über verschiedene Sensoren, die an der Fahrzeugfront angebracht werden. Ein solches



Multisensor-Setup besteht aus mehreren Kameras für den sichtbaren Wellenlängenbereich, welche neben Bilddaten auch Tiefenwerte der Umgebung im Nahbereich ermitteln kann (Stereokameras) sowie Kameras für mittlere und große Sichtweiten (ca. 300 bis 550 m). Ergänzt werden diese durch LiDAR-Sensoren, die das horizontale und vertikale Sichtfeld in sehr hoher Taktung mittels Abstandsmessungen „abscannen“. Eine Infrarotkamera erfasst zusätzlich Objekte mittels Detektion von langwelligem Infrarot im Bereich von 8 bis 14  $\mu\text{m}$ . Ebenso wie LiDAR-Sensoren, welche im Nahinfrarot Bereich arbeiten, ist die Infrarotkamera des beschriebenen Sensorsets unabhängig von der Umgebungsbeleuchtung und ermöglicht so die Wahrnehmung von statischen und dynamischen Objekten auch bei absoluter Dunkelheit, z.B. in Tunneln oder bei Nacht. Komplettiert wird das Sensorset für die Umfeldwahrnehmung durch Radarsensoren, welche bei einer Frequenz von 76 bis 77 GHz arbeiten. Alle Sensorrohdaten werden in einem hochperformanten Serversystem gesammelt und müssen bei irregulären Vorkommnissen im Digitalen Bahnsystem in Echtzeit an die Systeme im Bereich Steuerung (s. o.) übertragen werden können. Dort werden sie analysiert und dazu genutzt, Maßnahmen einzuleiten und den Verkehr zu optimieren. Eine Anbindung an schnellen Mobilfunk und leistungsfähige Cloudlösungen ist dafür eine wichtige Voraussetzung.

### 3.5 Sensorik für relative und absolute Lokalisierung

Um einen Zug präzise und sicher orten zu können (Funktionsbereich LZ), müssen i. d. R. verschiedene, voneinander unabhängige Ortsmessungen durchgeführt und konsolidiert werden. Technologisch wird dafür eine Sensorik für relative und absolute Lokalisierung verwendet. Für die relative Lokalisierung werden die im Bahnsektor schon lange üblichen Odometriesysteme zur Geschwindigkeits- und Wegmessung verwendet. Wegimpulsgeber und Radare sind bewährte Sensoren für die Odometrie, teils auch Beschleunigungssensoren. Mit der absoluten Lokalisierung durch Balisen im Gleis wird die Zugortung beim Überfahren zusätzlich mit höchster Sicherheit validiert.





Weitere, für die absolute Lokalisierung geeignete Sensoren sind die oben bereits beschriebenen LiDARs, die in hoher Frequenz Abstandsmessungen zu Landmarken, wie z.B. Oberleitungsmasten durchführen. Ergänzt werden diese Ortsmessungen durch hochgenaue Satellitennavigation wie GNSS, die ebenfalls absolut lokalisieren. In Kombination mit einer hochgenauen Digitalen Karte, die auf Basis des DR erstellt wird, können diese Technologien eine präzise Echtzeitortung von Zügen durchführen, ohne dass dabei zusätzliche Infrastruktur im Gleis benötigt wird. Ebenso wie bei der Umfeldwahrnehmung können auch die Ortungsinformationen im Digitalen Bahnsystem in hoher Frequenz an das Verkehrsmanagement übermittelt und zur Optimierung der Zugdisposition genutzt werden. Auch hier ist eine Anbindung an schnellen Mobilfunk und leistungsfähige Cloudlösungen unabdingbar.

### 3.6 Fahrzeugautomatisierung / Automatic Train Operation (ATO)

Automatisierte Fahrzeugsysteme sind wichtige Voraussetzung für das hoch- und vollautomatisierte Fahren. Sie können als "Autopilot" für den Zugverkehr betrachtet werden. Die Technologie setzt vorgegebene Anweisungen zum Beschleunigen und Bremsen um. Die Reaktionszeiten zwischen Übermittlung und Umsetzung der Fahrbefehle sind deutlich geringer und weniger Schwankungen unterworfen als bei der manuellen Steuerung. Geschwindigkeitsvorgaben werden exakt eingehalten. Das senkt den Energieverbrauch und stabilisiert den Betrieb. Dadurch können auf derselben Strecke mehr Züge fahren, was sich wiederum positiv auf die Netzkapazität auswirkt.

ATO-Technologien für die Bewegung von Zügen und für die Ausführung von Fahrfunktionen sind im Light-Rail- und Metrobereich schon lange im Einsatz und z.T. am Markt erhältlich. Von der DSD wurden diese Systeme erstmalig in Deutschland auch für Vollbahnen (Regional-, Fern- und Güterverkehr) im Fahrgastbetrieb getestet. Dabei müssen ATO-Technologien reibungslos mit ETCS zusammenarbeiten („ATO over ETCS“).

Es gibt vier Stufen der Automatisierung (Abb. 5). Je höher der Automatisierungsgrad, desto mehr Zukunftstechnologien müssen ins System integriert werden und ineinandergreifen.

		Zug aufrüsten und bereitstellen	Zug fährt	Tür schließt	Verhalten im Störfall
GoA* 1		Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer
GoA 2		Fahrer	Automatisch	Fahrer/Automatisch	Fahrer
GoA 3		Automatisch	Automatisch	Zugbegleiter	Zugbegleiter
GoA 4		Automatisch	Automatisch	Automatisch	Automatisch

\*GoA: Grade of Automation

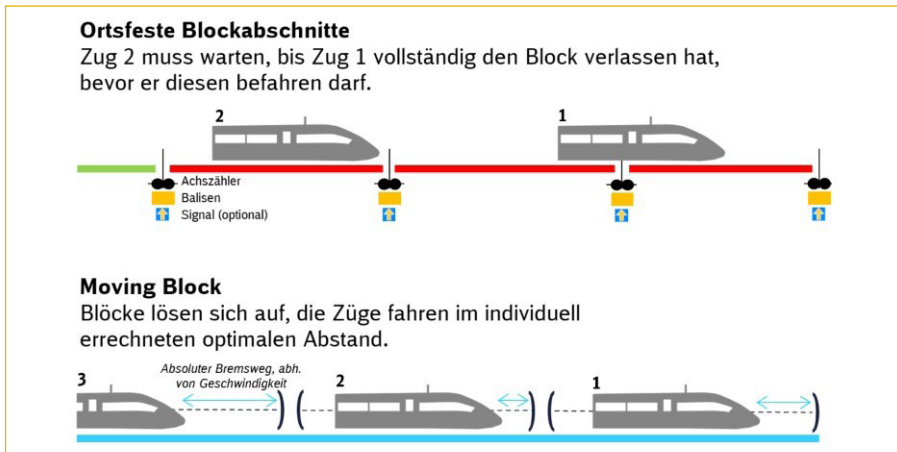
**Abb. 5:** Automatisierungsgrade des automatischen Fahrens

Für das hochautomatisierte Fahren im Automatisierungsgrad GoA 2 übernimmt das Fahrpersonal die reine Streckenbeobachtung und greift nur noch bei Unregelmäßigkeiten ein. Dazu braucht es neben der Automatisierung der Fahrfunktionen im Modus ATO over ETCS verlässliche Infrastrukturdaten aus dem DR sowie eine leistungsfähige (Mobilfunk-)Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur, z.B. zum Austausch eng

getakteter (Fahr-)Anweisungen. Beim höchsten Automatisierungsgrad GoA 4 – beim fahrerlosen Fahren – übernimmt der Zug mittels Sensorik schließlich auch die Umfeld- und Objekterkennung und benötigt ein KI-basiertes Störfallmanagement. Durch die notwendige Übermittlung von Bild- und Sensordaten an z.B. ein KI-basiertes Störfallmanagement steigen die Anforderungen an die Konnektivität noch einmal deutlich. Weitere Fahrfunktionen wie Auf- und Abrüsten, Sanden, Hupen etc. müssen ebenfalls komplett automatisiert werden.

### 3.7 Advanced Protection System (APS)

Heute ist die maximale Anzahl an Zügen im Netz durch die herkömmliche Technik begrenzt: Züge müssen aufgrund ihres langen Bremsweges einen Sicherheitsabstand zueinander einhalten. Dafür wird eine Strecke heute in ortsfeste, physikalische Blockabschnitte eingeteilt. Ein Block ist für den nachfahrenden Zug gesperrt, solange der vorausfahrende Zug diesen noch nicht verlassen hat (Abb. 6). In Stufe 1 der DSD werden die Fahrweg-sicherung und die Zugbeeinflussung aktuell mit DSTW und ETCS L2oS modernisiert. Dies bringt bereits Kapazitäts- und Effizienzeffekte. Dafür ist allerdings eine hohe Anzahl zusätzlicher Feldelemente (z.B. Achszähler) notwendig. Das volle Potenzial kann erst mit einer Sicherungstechnik entfaltet werden, die sich von der limitierenden strecken-zentrischen Logik löst und eine zugzentrische Sicherungslogik einführt. Dabei wird der Sicherheitsabstand zwischen Zügen nicht mehr statisch über Blockabschnitte geregelt, sondern über Abstände vor und nach dem sich bewegendem Zug, abhängig von seiner Geschwindigkeit und Bremskurve. Das ist die Aufgabe von APS.



**Abb. 6:** Moving Block erhöht die Kapazität im Schienennetz, da mehr Züge auf derselben Strecke eingesetzt werden können. Feldelemente wie Achszähler und Balisen fallen weg.



**Abb. 7:** Simulation einer irregulären Situation im photorealistischen digitalen Zwilling.

Ein Gepäckstück fällt aufs Gleis während einer Zugeinfahrt im Bahnhof.

Quelle: NVIDIA

APS kann technisch als modernes Stw beschrieben werden, welches entgegen der heutigen LST die Fahrwegsicherung und die streckenseitigen Komponenten der Zugbeeinflussung in einem System kombiniert. Zugseitig greift APS auf ETCS L3, den europäischen Standard der Zugbeeinflussung, zurück. Züge können dann in optimalen, flexiblen Abständen fahren (sog. „Moving Block“), sodass mehr Züge auf derselben Strecke eingesetzt werden können. Im zukünftigen Digitalen Bahnsystem teilt das Verkehrsmanagement (Funktionsbereich CTMS) dem APS seine Trassenwünsche mit. APS prüft nach höchsten Sicherheitsvorgaben (SIL 4), ob Fahrwege sicher eingestellt werden können und übermittelt die entsprechenden Stellbefehle an die Streckenelemente und die Fahrerlaubnis (ETCS Movement Authority) an den Zug. Die für diese Vorgänge notwendige Datengrundlage erhält APS von den oben beschriebenen Funktionsbereichen DR (Daten zu Topologie, Infrastruktur und Fahrzeugprofilen) und LZ (Daten Zugposition/Zugangfang, Geschwindigkeit und Zugvollständigkeit/Zugende). Dadurch kann APS seine Stellwerksaufgaben ganz ohne streckenseitige Ortungssysteme wie Gleisfreimeldeanlagen oder Wegmarken wie Balisen erledigen. Die benötigte Infrastrukturausrüstung reduziert sich dadurch deutlich. Neben dem großen Vorteil eines kapazitätsschaffenden Moving-Block-Betriebes mit reduzierter Infrastrukturausstattung hat APS noch weitere, deutliche Nutzeneffekte:

- Durch den Wegfall von Blöcken fallen auch fixe Fahrstraßen weg. Dadurch ist APS in der Lage, einen Zug während seiner Fahrt von einem beliebigen Start- zu einem

beliebigen Zielpunkt („geometrische Betrachtung“) stets individuell zu sichern – in Abhängigkeit von der aktuellen Betriebssituation. Dies ermöglicht einen wesentlich flexibleren Betrieb, der mit der heutigen Sicherungstechnik aufgrund festgelegter, projektierte Fahrstraßen nicht möglich ist.

- Durch die Integration von Anweisungen zur Einstellung der Fahrwegelemente und die Freigabe der Fahrt in einem System werden alle Störquellen beseitigt, die sich heute im Betrieb auf die Trennung der Kommunikation von Stw zur Strecke und Stw zum Zug zurückführen lassen. Viele dieser Störfälle existieren dann nicht mehr.

### 3.8 KI im Störfallmanagement

Um vollautomatisiert fahren zu können, muss zukünftig Sensorik für Umfeldwahrnehmung in Verbindung mit KI sowohl Gleisumfeld als auch Hindernisse erfassen und interpretieren können. Dabei müssen komplexe Aufgaben übernommen werden, wie bspw. die Streckenbeobachtung bei Zugfahrten und intelligente Entscheidungsfindung bei irregulären Vorkommnissen. Eine solche KI zu entwickeln und zu trainieren ist eine der größten Herausforderungen bei der technischen Umsetzung des Funktionsbereiches IPM.

Die Anzahl möglicher Situationen, die von einer KI im Bahnbetrieb der Zukunft gemeistert werden müssen, ist dabei sehr hoch: Sie reichen von alltäglichen bis zu sehr seltenen Ereignissen. Und das bei unterschiedlichsten Wetter-, Tages- und Jahreszeitbedingungen und an verschiedensten Orten im deutschen Schienennetz. Um eine solche KI zu trainieren, braucht es sehr große Datenmengen. Dabei ist es unmöglich, allein durch reale Aufzeichnungen alle denkbaren Ereignisse und Sonderfälle des Bahnbetriebs abzudecken. Daher muss auf simulierte Daten und die Methodik des Digitalen Zwilling zurückgegriffen werden (Abb. 7).

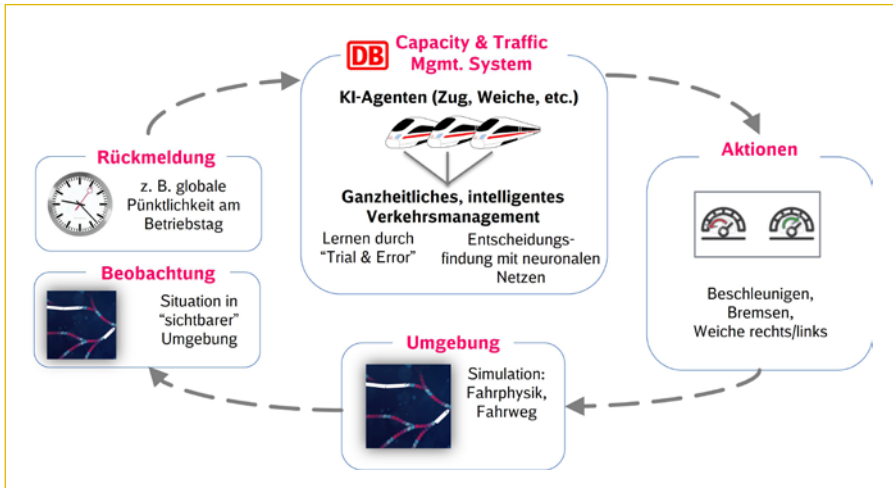
Losgelöst von der Verfügbarkeit realer Bahntrassen und Fahrzeuge kann man die KI im Digitalen Zwilling virtuell und zielgerichtet, d.h. signifikant schneller als im Fahrzeug, lernen lassen.

### 3.9 KI im Kapazitäts- und Verkehrsmanagement

Der zweite wichtige Funktionsbereich, in dem KI im Digitalen Bahnsystem eine Schlüsselrolle spielen wird, ist die Planung und Steuerung (Disposition) des Eisenbahnverkehrs. Wenn tausende von Zügen im dichten Verkehr unterwegs sind, müssen bei Störungen schnelle Entscheidungen zur Anpassung des Betriebsablaufs getroffen werden. Diese wiederum führen kaskadenartig zu weiteren notwendigen Änderungen. Bei dieser Komplexität geraten die heutigen, größtenteils manuellen Planungs- und Dispositionsprozesse rasch an ihre Grenzen. Bislang war es nur in Teilen möglich, diese Prozesse mit IT zu unterstützen. Haupthindernis war die mangelnde Skalierbarkeit existierender

Methoden. Diese Beschränkung kann inzwischen mit lernenden KI-Systemen überwunden werden. Grundlage für die technische Umsetzung dieses Funktionsbereiches ist daher ein KI-basiertes, automatisiertes Kapazitäts- und Verkehrsmanagementsystem (CTMS – Capacity & Traffic Management System).

Wichtige Komponente des CTMS ist ein sog. Optimierungskern. Mit Daten aus dem täglichen Betrieb – insbesondere von den technischen Systemen, die die funktionalen Cluster ATO und APS abbilden – ermöglicht er die Erstellung sekundengenaue Ablaufpläne für Zuggewegungen und damit eine Optimierung des Verkehrs in Echtzeit. Die KI-Methode im Kern des CTMS heißt „Deep Reinforcement Learning“. Nach dem Vorbild des menschlichen Lernens werden KI-Modelle durch Erfolg und Misserfolg in einer realistischen Simulation des Bahnbetriebes trainiert (Abb. 8).



**Abb. 8:** „Deep Reinforcement Learning“: Nach dem Vorbild des menschlichen Lernens werden KI-Modelle durch Erfolg und Misserfolg in einer realistischen Simulation des Bahnbetriebes trainiert.

In der simulierten Realität lernt die KI auf einem Abbild des realen Streckennetzes. Im Training erhält sie permanent Informationen über die Situation im virtuellen Schienennetz und muss Entscheidungen für die Steuerung der Züge treffen, welche dann ebenfalls in der Simulation ausgeführt werden. So lernt sie z.B. die beste Route und Geschwindigkeit für alle Züge zu jedem Zeitpunkt zu berechnen. Jede Handlung der KI wird mit einem Feedback über die Qualität der Entscheidung bewertet, sodass ein Lerneffekt entsteht. Zu Beginn werden der KI einfache Aufgaben gestellt. Durch Erfolge und Misserfolge lernt die KI ihre Entscheidungen stetig zu verbessern, und die Aufga-

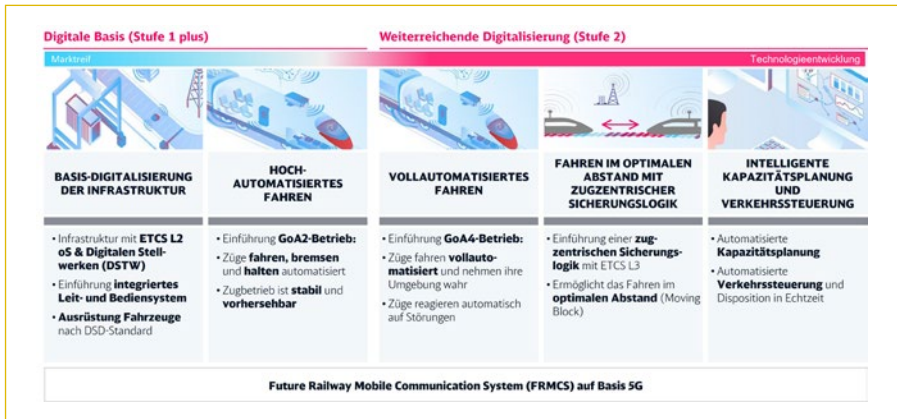
ben werden mit der Zeit komplexer. Die Bandbreite an Erfahrungen, die sie im Training macht, reicht von einfachen Standardsituationen des Eisenbahnverkehrs über Daten von realen Situationen bis hin zu einer Vielzahl verschiedener, ungewöhnlicher Störszenarien, um damit auch zukünftigen, unbekanntenen Situationen gewachsen zu sein.

Sobald die KI ausgebildet ist, kann sie innerhalb kürzester Zeit hochdetaillierte Ablaufpläne berechnen, nach denen die zuständigen Systemkomponenten den Verkehr steuern. Die enorme Skalierbarkeit und Komplexitätsreduktion lernender KI wird es in Zukunft möglich machen, deutschlandweit Fahrpläne in Echtzeit zu erstellen und anzupassen und auf dem Gesamtnetz den Eisenbahnverkehr zu optimieren.

## 4 Status und Ausblick zum Roll-out der DSD

### 4.1 Realisierungsstufen

Die Digitalisierung des Bahnsystems über die in Kapitel 1 beschriebenen zwei Stufen und das daraus resultierende Technologieportfolio wurde in 2023 von der DSD hinsichtlich Pilotierung, Produktentwicklung und Roll-out weiter operationalisiert. Der aktuelle Stand der Arbeiten ist in Abb. 9 gezeigt.



**Abb. 9:** Die Entwicklung und Einführung neuer Technologien erfolgen in zwei aufeinander aufbauenden Stufen. Wichtige Faktoren für den Roll-out sind die Marktreife und der Stand der Produktentwicklung.

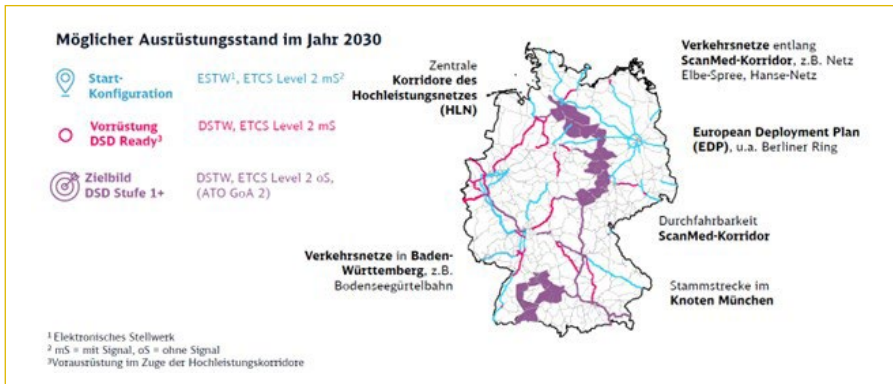
Die beiden Stufen unterteilen sich insgesamt in fünf Bereiche, die sämtliche Funktionalitäten des Zielbildes der DSD enthalten. Die Funktionalitäten für die „Digitale Basis“ sind bereits marktreif und bereit für erste Implementierungen. So konnte neben ETCS/DSTW (Stufe 1) das hochautomatisierte Fahren im Automatisierungsgrad GoA 2



2023 Roll-out-Status erlangen (sog. „Stufe 1+“). Die Funktionalitäten für die „weiterreichende Digitalisierung“ (Stufe 2) befinden sich zu großen Teilen noch in der Technologieentwicklung. Diese reicht von Pilotprojekten und Prototypen, die bereits auf der Schiene erprobt werden, bis hin zu Laborerprobungen und Technologieexplorationen. Der Roll-out orientiert sich jeweils an verfügbarer Technik und wirtschaftlichem Nutzen, während gleichzeitig weitere Innovationen vorangetrieben werden und nach und nach Roll-out-Status erlangen.

#### 4.2 Roll-out-Plan DSD Stufe 1+

Im Jahr 2023 hat die DSD – unter dem Vorbehalt der Bereitstellung der benötigten Haushaltsmittel – einen Roll-out-Plan für die Digitale Basis Stufe 1+ erarbeitet, einen möglichen Ausrüstungsstand für 2030 angegeben (Abb. 10) sowie eine ETCS-Migrationsstrategie veröffentlicht [3].



**Abb. 10:** Möglicher Ausrüstungsstand 2030 im deutschen Schienennetz. Beginnend mit einer Startkonfiguration werden sukzessive bis 2030 erste Strecken zielbildkonform ausgerüstet.

Dabei wird die Umstellung auf ETCS in einem längeren Zeitraum sowie in enger Abstimmung mit dem Sektor erfolgen. Ziel ist es dabei, das gesamte Schienennetz mit ETCS auszurüsten und in diesem Zug die Bestandssysteme punktförmige Zugbeeinflussung (PZB) und linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) vollständig abzulösen. Begonnen wird dabei mit einer Startkonfiguration, bei der aufgrund der Verfügbarkeit am Markt zunächst noch Elektronische Stellwerke (ESTW) und ETCS L2mS zum Zuge kommen. Bis 2030 sollen dann sukzessive neue Technologien in den Roll-out integriert werden. Auch die DSD-Vorrüstung im Zuge der Sanierung der Hochleistungskorridore ist dabei vorgesehen. Bis 2030 sollen dann erste Strecken komplett



zielbildkonform bzgl. Stufe 1+ ausgerüstet sein, d. h. mit DSTW, ETCS L2oS und zusätzlich mit Technologien des hochautomatisierten Fahrens in der Stufe ATO GoA 2 sowie FRMCS/5G. Eine Ausnahme dabei ist der Digitale Knoten Stuttgart (DKS). Dort wird bereits bis 2026 das Zielbild der Stufe 1+ erreicht. Details hierzu in [4].

## 4.3 DSD Stufe 2 – Stand der Technologieentwicklung

### Vollautomatisiertes Fahren im Automatisierungsgrad GoA 4

Gleich zum Start der DSD wurde mit der Entwicklung von Systemen zum vollautomatisierten, fahrerlosen Fahren in der Automatisierungsstufe GoA 4 begonnen. Ein erstes Pilotprojekt mit Partnern aus der Automobil- und Bahnindustrie wurde bereits im Jahr 2019 gestartet und konnte im Mai 2023 erfolgreich abgeschlossen werden. Im Projekt Sensors4Rail wurden erstmals sensorbasierte Wahrnehmungssysteme, wie man sie aus dem Automobilssektor vom autonomen Fahren kennt, im Bahnbetrieb erprobt [5]. Auf dem ITS Weltkongress 2021 in Hamburg wurde ein entsprechend ausgestatteter Triebzug der S-Bahn Hamburg erstmalig der Öffentlichkeit präsentiert. In einer zweiten Phase des Projektes lag der Fokus auf einer räumlichen und zeitlichen Ausweitung der Testfahrten zum Aufbau einer umfassenden Datengrundlage. Hierzu wurde die Software maßgeblich weiterentwickelt und nahezu 500 Stunden hochqualitative, synchrone Sensor- und Funktionsdaten bei unterschiedlichsten Wetter- und Lichtbedingungen gesammelt [6]. Die Erkenntnisse und Daten aus dem S4R-Projekt bilden eine wichtige Basis für die weitere Spezifikation der ATO-GoA 4-Systemarchitektur.

Nahtlos wurde auf der Grundlage von Sensor4Rail im Juni 2023 das nächste Entwicklungsprojekt zum vollautomatisierten Fahren gestartet. In „Automated Train“ erproben zehn Partner aus verschiedenen Industriebranchen in den kommenden drei Jahren vollautomatisierte Bereitstellungs- und Abstellungsfahrten von Zügen. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unterstützt das Vorhaben mit rund 42,6 Mio. EUR [7]. Bis 2026 werden als Prototypen ein Zug von Siemens Mobility sowie ein Zug der S-Bahn Stuttgart ausgerüstet. Der Zug von Siemens Mobility vom Typ Mireo Smart wird dabei auf einem Testgelände den Weg aus der Abstellanlage bis zur ersten Station vollautomatisiert und ohne Triebfahrzeugführer (Tf) zurücklegen. Bei Hindernissen bremst das Fahrzeug selbstständig ab. Der Zug der S-Bahn Stuttgart sammelt ergänzend dazu unter anderem Daten für die Hinderniserkennung im realen Fahrbetrieb. Beide Fahrzeuge werden mit der gleichen Hardware, aber mit unterschiedlichen Softwarelösungen ausgerüstet. Dadurch können die aufgenommenen Sensordaten und die Reaktionen der Software auf besondere Vorkommnisse miteinander verglichen werden.

Die Technologiereife der verschiedenen Technologien, die für vollautomatisiertes, fahrerloses Fahren im S-Bahn-Verkehr benötigt werden, wird Ende der 2020er Jahre erwartet. Mit einem Roll-out-Beginn von vollautomatisierten Bereitstellung- und Abstellungsfahrten kann Anfang bis Mitte der 2030er Jahre gerechnet werden. Weitere roll-out-fähige Funktionalitäten werden sukzessive hinzugefügt, bis hin zum vollen Funktionsumfang in allen Verkehrsarten Ende der 2030er Jahre.

### **Zugzentrische Sicherungslogik und Moving Blocks**

Status Einführung einer zugzentrischen Sicherungslogik mit ETCS L3: APS Demonstrator oder APD-Migrationsstudie: Um zukünftig einen Bahnbetrieb ohne feste Blöcke und fixe Fahrstraßen zu verwirklichen, ist geplant, ab 2024 diverse Prototypen und Tests u. a. im „Digitalen Testfeld Bahn“ im Erzgebirge durchzuführen. Ebenso wird auf europäischer Ebene im Rahmen von Europe’s Rail Joint Undertaking (ERJU) an einem Moving Block Demonstrator gearbeitet [8]. Die ersten Pilotprojekte im tatsächlichen Betrieb sollen etwa Anfang der 2030er Jahre abgeschlossen werden, ein großflächiger Roll-out in Knoten und in der Fläche könnte ab Mitte der 2030er Jahre beginnen.

### **Intelligente Verkehrssteuerung und Kapazitätsplanung**

Bereits 2018 hat die DSD begonnen, mit namhaften industriellen und akademischen Partnern ein intelligentes, KI-basiertes Verkehrs- und Kapazitätsmanagementsystem zu entwickeln. Dabei konzentriert man sich im ersten Schritt auf ein CTMS, welches die Kapazität des Schienennetzes der DB Netz zum zentralen Optimierungsgegenstand hat. Ziel ist, die Kapazität des Netzes optimal an dessen Nutzer zu vergeben. Kapazität wird nicht nur von fahrenden Zügen verbraucht, sondern auch von abgestellten Fahrzeugen sowie durch Baustellen und weitere Restriktionen der Netznutzung. Für all diese Kapazitätsverbraucher macht das CTMS detaillierte Ablaufpläne in Zeit und Ort, und es setzt diese Ablaufpläne betrieblich um. Der aktuell erreichte Prototyp plant bis zu 400 Zugfahrten (jedoch noch keine Baufenster) über mehrere Betriebsstunden auf mittelgroßen Netzkorridoren von rund 1000 Streckenkilometern. Die generierten Ablaufpläne sind mikroskopisch scharf und enthalten die notwendigen Anfragen nach Weichenstellung und Erteilung von Fahrfreigaben an das Stellwerks- und Zugsicherungssystem.

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 und Entwicklungsmethoden zum Einsatz. Die fortschrittlichste und leistungsfähigste der eingesetzten Methoden ist das bereits oben genannte „Deep Reinforcement Lear-

ning“ (bestärkendes Lernen), einem 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. Die bisherigen Ergebnisse sind in [9] dargestellt.

Der erste betriebliche Einsatz des CTMS soll nach heutiger Planung im DKS erfolgen [4]. Dort soll das CTMS ab 2030 zunächst die erweiterte Stammstrecke der S-Bahn via ATO GoA 2 auf der Grundlage eines DSTW und mit ETCS L2oS steuern. Anschließend wird der Steuerbereich des CTMS sukzessive ausgeweitet. Dabei kommen Regionalverkehr und Fernverkehr hinzu und zum Teil auch Güterverkehr. Parallel zum Ausbau digitaler Stellwerke 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. Ende der 2020er Jahre sollte KI-basierte Disposition dann als Vorschlagssystem für intelligente, vorausschauende Dispositionsvorschläge pilotiert werden können. Dadurch kann erstes Optimierungspotenzial im täglichen Betrieb realisiert werden. Auch hier rechnet man bis Mitte der 2030er Jahre mit roll-out-fähigen Systemen, die vollen Funktionsumfang bieten und die Optimierung der Fahrplanung und Verkehrssteuerung im gesamten deutschen Streckennetz ermöglichen.

## Quellen

- [1] Bührsch, P.; Büker, T.; Schotten, S.; Hardel, S.: Vorteile und Nutzen von ETCS L2oS und DSTW im Schienenverkehr, *EIK 2022*, S. 223–238
- [2] 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, *EIK 2023*, S. 116-142
- [3] ETCS-Migrationsstrategie, online unter: <https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/nutzungsbedingungen/etcs/ETCS-Migrationsstrategie-10115054#?>
- [4] Beyer, M.; Blateau, V.; Bitzer, F.; Dietrich, F.; Lammerskitten C.; Lück, B.; Richter, R.; Rudolph, C.; Vogel, T.: Der Digitale Knoten Stuttgart wird Realität, *EI 01/2023*, S. 54-58
- [5] Hauswald, C. et al.: Digitale Schiene Deutschland testet erstmals sensorbasierte Wahrnehmungssysteme im Bahnbetrieb, *Deine Bahn 04/2022*
- [6] Hauswald, C.; Skibinski, S.; Reiniger, F.; Euler, T.; Isaac, G.; Irvathraya, A.: Sensors4Rail: Ein Erfolgsprojekt ist zu Ende, *EI 09/2023*, S. 55-59
- [7] Presseinformation DB AG vom 5.7.2023, online unter: [https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart\\_zentrales\\_uebersicht/Deutsche-Bahn-und-Industrie-erproben-vollautomatisiertes-Fahren-von-Zuegen-10870974](https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Deutsche-Bahn-und-Industrie-erproben-vollautomatisiertes-Fahren-von-Zuegen-10870974)
- [8] Skowron, F.; Treydel, R.: Blöcke waren gestern – Chancen einer zugzentrischen LST, *EI 11/2022*, S. 34-37
- [9] Küpper, M.: Das Capacity & Traffic Management System für die Digitale Schiene, *EI 10/2023*



**Dipl.-Phys. Achim Fiack**  
Steuerung und Industriepartnerschaften  
achim.fiack@deutschebahn.com



**Franziska Weller, M.A.**  
Steuerung und Industriepartnerschaften  
franziska.weller@deutschebahn.com



**Dr. Moritz Heimes**  
Leiter Steuerung und Industriepartnerschaften  
moritz.heimes@deutschebahn.com



**Dipl.-Math. Thomas Laux**  
Leiter Digitalisierung Bahnsystem  
thomas.laux@deutschebahn.com

Alle Autoren:  
Digitale Schiene Deutschland  
DB Netz AG, Berlin