

Simulationsbasierte Systemtests

Schlüssel für die Digitalisierung des Bahnsystems



Quelle: dSPACE GmbH

Dr. Dirk Spenneberg, Roa Al-Hashimi, beide Systemspezifikation und -integration, Digitale Schiene Deutschland, DB Netz AG, Berlin, und **Niklas Kersting**, Simulation Models & Scenarios, dSPACE GmbH, Paderborn



Für die Erprobung und Einführung neuer Technologien und Fähigkeiten in das Bahnsystem, wie zum Beispiel das fahrerlose Fahren, sind hochwertige Testlabors von entscheidender Bedeutung. Dort können neue Produkte in einer simulierten Umgebung verifiziert und validiert werden. Um eine Simulationsumgebung für diesen Zweck zu erstellen, sind die Deutsche Bahn und dSPACE, ein führender Experte im Bereich der Simulation, eine Kooperation eingegangen. Der folgende Artikel stellt dar, worin die Zusammenarbeit besteht und was bereits erreicht wurde. Zudem wird erörtert, warum simulationsbasierte Systemtests für die Entwicklung und das Testen des zukünftigen vollautomatischen, fahrerlosen Zugbetriebs (Automatic Train Operation in Grade of Automation 4/ATO GoA 4) so wichtig sind.

Das Eisenbahnsystem ist eines 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 Prozent 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 der entscheidende Hebel. Das ist die Aufgabe der Sektorinitiative Digitale Schiene Deutschland. Die Initiative und ihre Partner aus Industrie und Wissenschaft haben das Ziel, moderne Technologien mit neuartigen Fähigkeiten in den Schienenverkehr einzuführen, um die vorhandene Infrastruktur besser zu nutzen und den Verkehr auf der Schiene noch attraktiver zu gestalten.

Anforderungen an die Simulationsumgebung

Im Bahnbereich ist es sehr komplex, zeitaufwendig und kostspielig, Tests unter realen Bedingungen durchzuführen und Daten zu sammeln. Ein wesentliches Hindernis ist die Verfügbarkeit von Gleisen und Schienenfahrzeugen, da diese betrieblich benötigt werden. Außerdem sind Testfahrten und die Möglichkeit, Strecken und Fahrzeuge für Tests auszurüsten,

aufgrund der hohen einzuhaltenden Sicherheitsstandards stark reglementiert. Es gibt darüber hinaus nur wenige Testfahrzeuge wie z. B. das advanced Train Lab (aTL) der DB und zu wenig Teststrecken wie das Digitale Testfeld Bahn (DTB) im Erzgebirge, so dass die Testmöglichkeiten in der realen, operativen Umgebung langfristig limitiert bleiben.

Ein Lösungsansatz für diese Problematik ist Simulation. Der Einsatz von simulierten Umgebungen ist in allen Branchen eine bewährte Methode zum Testen komplexer Regelsysteme und verbessert den Entwicklungs-, Verifizierungs- und Validierungsprozess erheblich.

Testprojekte zum fahrerlosen Fahren im o. g. Automatisierungsgrad GoA 4 sind dabei besonders aufwendig. Hierbei muss eine Vielzahl an Szenarien berücksichtigt und abgetestet werden. Um dieses in realistischer Zeit umzusetzen, muss in einem ATO GoA 4-Projekt ein Schienenfahrzeug in seiner Einsatzumgebung simuliert werden. Die Simulation und die dafür verwendeten Werkzeuge müssen für den Test sicherheitskritischer Funktionen qualifiziert werden. Zukünftig können dadurch möglichst viele Tests aus dem Feld in das Labor zukünftig verlagert werden.

Ein ATO GoA4-System in einem Schienenfahrzeug übernimmt alle Aktionen des Triebfahrzeugführers. Dazu zählen im Wesentlichen das Auf- und Abrüsten des Triebfahrzeugs, die Überwachung des Fahrgastwechsels und das Fahren inklusive der Streckenbeobachtung während der Fahrt. Auch das Reagieren auf außerordentliche Situationen muss dabei abgedeckt werden, z. B. Objekte im Gleisbereich (u. a. Bäume, Personen, Tiere), kritische Wetterbedingungen (z. B. Überflutung der Gleise) und gefährliche Störungen am Zug (z. B. Brand).

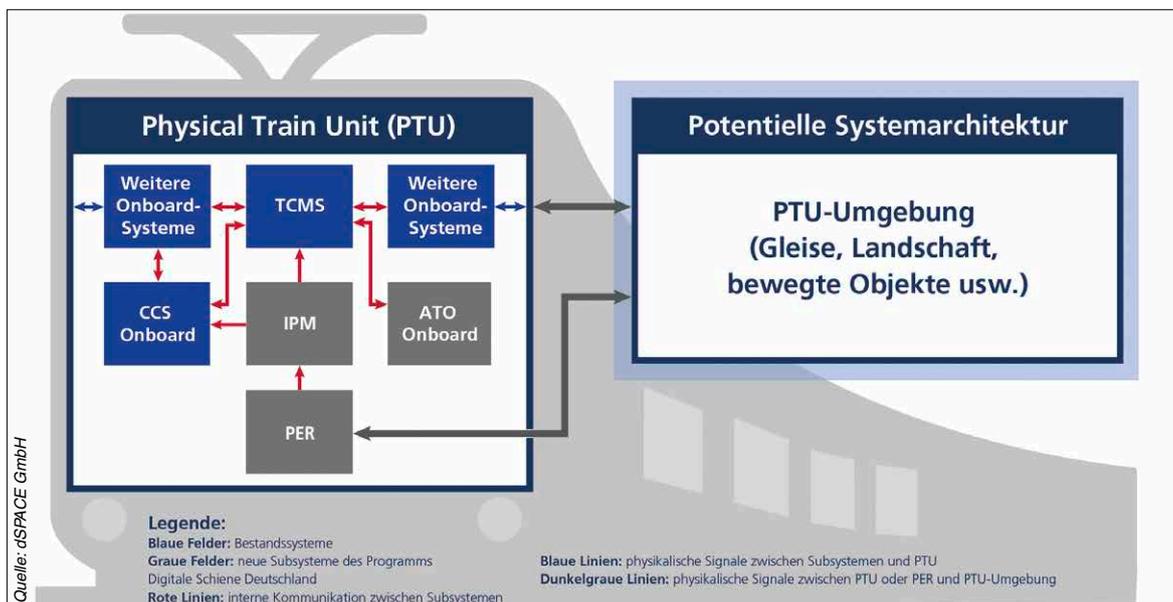


Abbildung 1: Vereinfachter Überblick über die Systemarchitektur und die Interaktion zwischen Subsystemen (rote Linien), Subsystemen und PTU (blaue Linien) oder PER und PTU-Umgebung (graue Linien)

Gemäß der Open Command-Control and Signalling On-Board Reference Architecture (OCORA)^[1] sind die wesentlichen Subsysteme eines solchen vollautomatisierten ATO GoA4-Systems das ATO onboard, also die Automatisierung der eigentlichen Fahrfunktion (anfahren, beschleunigen, bremsen, halten), die Umfeldwahrnehmung bzw. das Perception-System (PER) und das Incident Prevention Management System (IPM), welches basierend auf den durch das PER erkannten Objekten eine Reaktion auslöst. Diese Subsysteme stützen sich auf Daten, die von komplexen Sensorsystemen wie Kameras, RADAR und LiDAR gewonnen werden.

Ein Beispiel für ein aktuelles Projekt mit einem solchen Sensoraufbau ist Sensors4Rail, welches Mitte 2023 abgeschlossen wurde (siehe auch^[2]). Diese Subsysteme sind in der Regel mit der Leittechnik auch bekannt als Train Control Management System (kurz TCMS), dem Onboard-Zugsicherungssystem (CCS), zum Beispiel einem ETCS-Level-2-Onboard-System, und gegebenenfalls verschiedenen weiteren Systemen verbunden. Darüber hinaus interagieren sie mit der physischen Zugeinheit (Physical Train Unit, PTU). Im Fall von PER, haben diese Subsysteme auch eine Schnittstelle zur PTU-Umgebung, welche PER mit seinen Sensoren abtastet (Abbildung 1 auf Seite 27).

Um zu prüfen, ob die Werkzeugkette der Fa. dSPACE für den Test eines ATO GoA4-Systems eingesetzt werden kann, wurde ein Proof of Concept aufgesetzt. Dabei lag der Fokus auf dem Test des neuen Subsystems IPM. Von der DB wurde ein vereinfachtes Modell vorab entwickelt und als zu testendes System verwendet. Das IPM-Modell muss für die Simulation in seine Umgebung eingebettet werden, sodass ein geschlossener Regelkreis entsteht. Dazu müssen alle anderen erforderlichen Subsysteme wie TCMS (zu dem IPM eine Schnittstelle hat) und weitere angeschlossene relevante Onboard-Systeme (z. B. Bremse /Antrieb/CCS Onboard) sowie die Zugdynamik und die Zug-Umgebung (PTU) ebenfalls simuliert werden.

Abbildung 2:
Der simulierte Zug
BR 423 in MotionDesk



Um Objekte zu simulieren, die typischerweise von einem PER erkannt werden, ist ein realistisches Umgebungsmodell mit Gleisanlagen, Landmarken, sowie typischen oder auch ungewöhnlichen statischen und beweglichen Objekten erforderlich. Diese Objekte werden durch die Umfeldwahrnehmung erkannt, welche bei diesem Proof of Concept ebenfalls simuliert wird. Die 3D-Objekterkennung beruht hierbei auf der sogenannten Ground-Truth-Objekterkennung und -identifizierung. Das bedeutet, dass die Objekterkennungen der simulierten Umfeldwahrnehmung dem entsprechen, was im Umgebungsmodell auch simuliert wird. Es gibt somit keine fehlerhafte Objekterkennung, weder bezüglich der Klassifikation noch der Position oder des gegebenenfalls vorhandenen Bewegungsvektors. Das bedeutet, dass der Test des ATO GoA4-Systems dann unter der Annahme eines ideal arbeitenden PER erfolgt. Die Simulation der Auswirkungen von Fehlererkennung wurde in diesem Fall absichtlich ausgeklammert, um den Umfang sinnvoll zu begrenzen.

Sollte perspektivisch auch das PER getestet werden, müsste eine realistische Sensorsimulation erstellt und realistische Sensordaten in das PER eingespeist werden. Diese synthetischen Daten müssten zudem für den Test qualifiziert werden, indem nachgewiesen wird, dass sie die Realität identisch abbilden. Aktuell gibt es dafür keine etablierten Ansätze, die eine vollumfängliche Validierung sicherstellen, sodass mindestens mittelfristig davon auszugehen ist, dass der Perzeptionsanteil nur simuliert werden kann und die Verifikation und Validierung eines PER-Subsystems noch primär anhand von Feldtests erfolgen muss.

Da im Vergleich zur Straße Feldtests bei der Eisenbahn sehr viel aufwendiger sind und entsprechend viel seltener durchgeführt werden können, treibt die Digitale Schiene Deutschland die Entwicklung von Digital Twins voran. Ziel dabei ist es, zukünftig mit einem photorealistischen Abbild der echten Schienenumgebung sowie der exakten Nachbildung der Sensorsets der Züge in der virtuellen, simulierten Welt physikalisch korrekte Messdaten zum Trainieren der notwendigen KI zu sammeln (siehe auch [7]).

Erstellung der Simulationsumgebung

Zunächst wurde ein Simulationsmodell benötigt, das eine geeignete Darstellung der Zugdynamik bietet und dabei den Aufbau verschiedener Zugverbände berücksichtigt. Ziel war es, ein generisches Zugdynamikmodell zu implementieren, das sich vorerst auf die Längsdynamik konzentriert. dSPACE hat bereits die Toolsuite „Automotive Simulation Models“ (ASM) für die Simulation von Motoren, Fahrzeugdynamik, elektrischen Komponenten und der Verkehrsumgebung in ihrem Portfolio (siehe [3]). Sie wurde eigentlich für den Automobilsektor entwickelt. Daraus kam das ASM-Fahrdynamikmodell als Ausgangspunkt für bahnspezifische Modellanpassungen zum Einsatz.

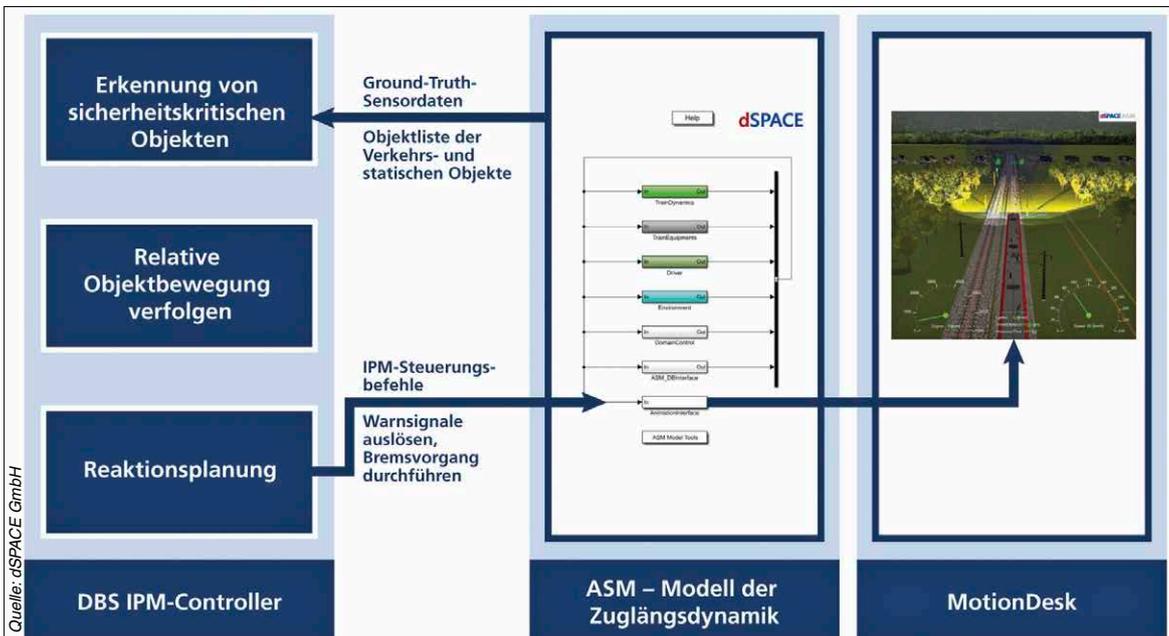


Abbildung 3: Schematische Darstellung des geschlossenen Regelkreises zwischen IPM-Controller und dSPACE ASM

Darin werden bereits einige allgemeine Effekte wie Rollwiderstand, Steigungswiderstand oder Luftwiderstand berücksichtigt, die sowohl für die Fahrzeug- als auch für die Zugdynamik gelten.

Andere Berechnungen, wie die maximal übertragbare Reibungskraft zwischen Rad und Schiene, hängen von bahnspezifischen Einflüssen wie der Anzahl der angetriebenen und bremsenden Achsen ab. Das ASM-Modell wurde um diese Einflüsse erweitert, um eine realistische Zugdynamik zu simulieren. Das erstellte Zugdynamikmodell wurde mit anderen ASM-Modellen für die Straßen-, Umwelt- und Sensorsimulation kombiniert. Diese konnten wiederverwendet werden, da der Aufbau von Bahn- und Straßennetzen ähnlich ist.

Das Zugdynamikmodell wurde mit dem dSPACE Werkzeug ModelDesk parametrisiert. Der gewählte generische Modellansatz ermöglicht es, mit weniger Parametrisierung ein realistisches Zugverhalten zu erreichen. Für den Proof of Concept wurde das ASM-Modell so parametrisiert, dass es einer Baureihe 423 der Deutschen Bahn AG mit vier Wagen entspricht.

Durch den Import von bahnspezifischen Objekten wie Schienen, Oberleitungsmasten und bahnspezifischen Lichtsignalen ließ sich die grundlegende Straßenvisualisierung in eine bahnnähnliche Umgebung verwandelt. Zu Demonstrationszwecken wurde ein Bahnschienenetz aus OpenStreetMap in ModelDesk importiert. Da das dSPACE Konvertierungswerkzeug jedoch für den Import von Straßennetzen und deren Objekten ausgelegt ist, mussten einige bahnspezifische Elemente wie Schienen, Oberleitungen und Bahnsteige manuell hinzugefügt werden. Geplant ist, dass diese Daten zukünftig aus dem Digital Register, einer „Single source of truth“ für Infrastrukturdaten

eingelassen werden, welches von der Digitalen Schiene Deutschland ebenfalls entwickelt wird.^[4] Für die Visualisierung wurde das dSPACE Werkzeug MotionDesk eingesetzt (Abbildung 2).

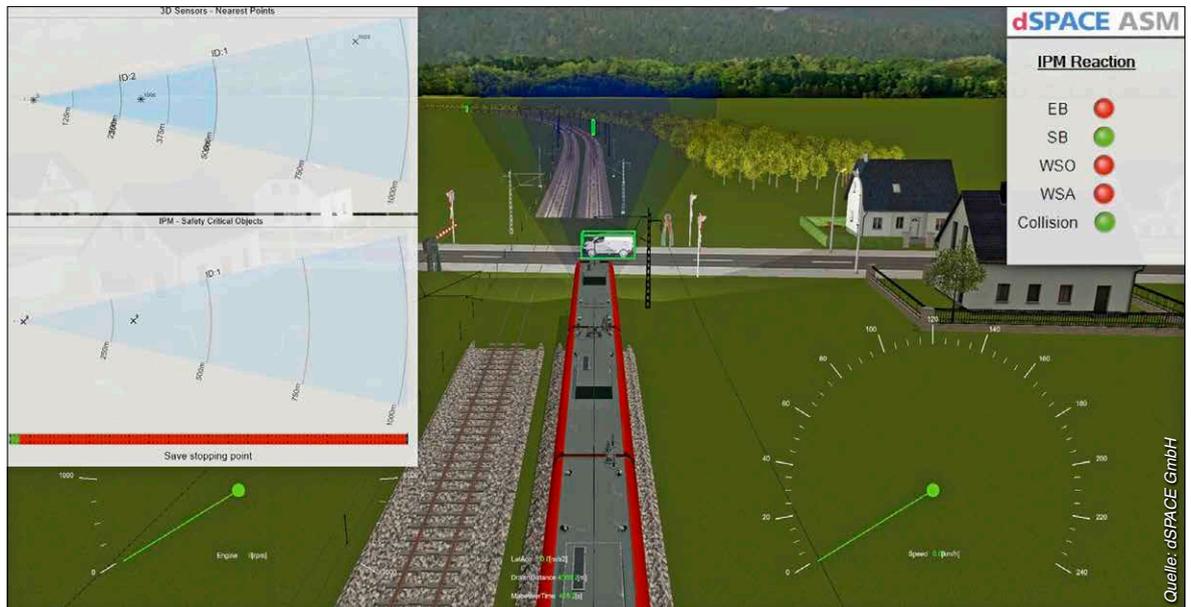
Der nächste Schritt war die Integration des vereinfachten IPM-Controllers der Deutschen Bahn, um einen geschlossenen Regelkreis mit dem ASM-Modell zu bilden. Der IPM-Controller verarbeitet die von den ASM-Ground-Truth-Sensormodellen erkannten Objekten als Input und bestimmt, ob der Zug auf diese Objekte reagieren muss. Danach wird die vom IPM-Controller gewünschte Reaktion wie zum Beispiel das Auslösen von Warnsignalen oder das Ausführen einer Betriebs- oder Schnellbremsung vom ASM-Zugdynamikmodell ausgeführt. Eine schematische Darstellung des Regelkreises ist in Abbildung 3 abgebildet.

Evaluierung der Simulation

Um die Eignung der erstellten Simulationsumgebung und der zugehörigen dSPACE Werkzeugkette für die Digitale Schiene Deutschland zu testen, wurden zwei verschiedene Anwendungsfälle erstellt.

Der erste Anwendungsfall beinhaltet eine Situation in der ein Reh, die Gleise überquert, während der Zug darauf zufährt. Das Reh wird mit Hilfe der 3D-Ground-Truth-Sensoren als ein sich bewegendes Tierobjekt identifiziert und an den IPM-Controller übergeben. IPM reagiert auf das Objekt im Bereich des Gleisbetts, indem es das Signalhorn betätigt sowie ein optisches Warnsignal und die Schnellbremse (Emergency brake, EB) betätigt. Verlässt das Reh den Gleisbereich und wird nicht mehr erkannt, nimmt der Zug den regulären Betrieb wieder auf.

Abbildung 4:
Unfallvermeidung mit
einem Auto an einem
Bahnübergang



Der zweite erfolgreich entwickelte Anwendungsfall beinhaltet folgende Situation: Ein Zug bewegt sich auf einen Bahnübergang zu, auf dem sich ein Auto befindet. Dieses Szenario ist in Abbildung 4 dargestellt.

Das Szenario beginnt damit, dass der Zug mehrere Objekte mit Hilfe der 3D-Ground-Truth-Sensoren identifiziert und diese Objekterkennung an den IPM-Controller weiterleitet. Wie in der Abbildung 4 oben links und den grünen Rechtecken um die Objekte in der MotionDesk-Visualisierung dargestellt, werden drei Objekte von den Sensormodellen erkannt. Allerdings scheinen sich nur zwei Objekte im Weg des Zugs zu befinden und werden vom IPM-Controller als sicherheitskritisch eingestuft (Abbildung 4 links in der Mitte). Die Reaktion darauf ist eine optische Warnung per Scheinwerfer sowie eine Signalthornwarnung mit Betriebsbremse (Service Brake, SB).

Ist ein Anhalten mit der Betriebsbremse aufgrund des zu geringen Abstandes zum Fahrzeug nicht mehr möglich, wird durch den IPM-Controller die Schnellbremse (Emergency Brake, EB) aktiviert. Aufgrund des verkürzten verbleibenden sicheren Anhaltewegs löst der IPM-Controller in diesem Fall die Schnellbremse (EB), das optische Warnsignal (WSO) sowie das akustische Warnsignal (WSA) aus (siehe auch Tabelle rechts oben in Abbildung 4). Der Zug kann in diesem Anwendungsfall gerade noch rechtzeitig bremsen.

Diese beiden simulierten Anwendungsfälle lieferten wichtige Erkenntnisse bezüglich der Sensorpositionierung und der Objekterkennung. Die Sensoren der Umfeldwahrnehmung erstellen Objektlisten mit allen Objekten in ihrem kegelförmigen Beobachtungsbereich, die an das IPM-Modell weitergegeben werden. Wenn jedoch ein sicherheitskritisches Objekt aus dem

Beobachtungsbereich der Sensoren verschwand, fiel in der Simulation auf, dass das einfache IPM-Modell stets direkt zum Normalbetrieb zurückkehrte. Die Objekte und ihre relative Bewegung werden von der Regelstrategie nicht mehr berücksichtigt.

Der zweite Anwendungsfall umfasst Tests für Szenarien, in denen der Zug nicht rechtzeitig vor dem Zusammenstoß mit dem Fahrzeug anhalten kann. Kurz vor der Kollision verschwand das Auto aus dem Beobachtungsbereich der Sensoren, und der vereinfachte IPM-Controller ging unerwünscht direkt wieder in den Normalbetrieb über. Dies zeigt, dass eine frühzeitige Simulation dazu beitragen kann, denn System- bzw. Reglerentwurf zeitnah zu validieren. Im obigen Beispiel mussten auf Basis dieser Simulationsergebnisse sowohl die Sensorpositionierung als auch die Regelstrategie überdacht und verbessert werden. Da die Simulation ermöglicht, diese Erkenntnisse bereits im frühen Stadium eines Entwicklungsprojekts zu gewinnen, können die Kosten für die Fehlerkorrektur, im Vergleich zu Projekten, wo diese Probleme erst in späteren Tests erkannt werden würden, minimiert werden.

Anstehende Herausforderungen und Ausblick

Der Proof of Concept zeigt, dass es möglich ist die aus dem automotivem Umfeld stammende dSPACE Werkzeugkette anzupassen, um eine Bahnsimulationsumgebung für den Systemtest in zukünftigen Projekten der Digitalen Schiene Deutschland aufzubauen. Da der Proof of Concept die Erwartungen beider Seiten erfüllt hat, planen die DB Netz AG und dSPACE eine Vertiefung der Zusammenarbeit durch eine gemeinsame Erweiterung der implementierten Bahnsimulationsumgebung.

Die Simulation muss erweitert werden, um die gesamte zukünftig erforderliche Funktionalität eines ATO GoA4-Systems zu simulieren. Die Arbeiten daran haben bereits begonnen. Die Simulations- und Testumgebung wurde bereits um einige Onboard-Regelsysteme wie Tür-, Trittstufen- und Stromabnehmersteuerungen erweitert, um z. B. zukünftig das Onboard-ATO zusammen mit IPM testen zu können. Weitere zugseitige und entsprechende streckenseitige CCS-Funktionen werden in naher Zukunft integriert und getestet. Da bisher nur einfache Zugverbände betrachtet wurden, ist außerdem geplant, das Konzept auf mehrere gekoppelte Zugverbände zu erweitern.

Darüber hinaus werden die Arbeiten nun in das dSPACE-Werkzeug AURELION migriert. Erste Ergebnisse der Migration sind in Abbildung 5 dargestellt. AURELION basiert auf der Unreal Engine und ermöglicht eine realistischere Umgebungsvisualisierung und falls zukünftig benötigt eine sensorrealistische Simulation (siehe [5]). Es wird MotionDesk in der dSPACE Werkzeugkette ersetzen. AURELION bietet bessere Möglichkeiten für eine physikalisch realistische Simulation, die auch die Simulation von Kamera-, LiDAR und RADAR Sensoren einschließt. Diese wird erforderlich, falls das PER ebenfalls Teil des System-under-Test wird. Dann müssten Sensoreffekte wie Ablenkung und Mehrwegeausbreitung bei Radarsensoren oder Punktwolkenverteilungen und Bewegungsverzerrungseffekte bei Lidarsensoren berücksichtigt werden.

Bisher wird die vorgestellte Umgebung für Model-in-the-Loop-Simulationen und -Tests verwendet. D. h. es werden damit aktuell nur Modelle der späteren Onboard-Steuergeräte getestet. Es ist aber bereits geplant, die Umgebung auch für Software- und Hardware-Tests des ATO GoA4-Systems im Labor der Deutschen Bahn zu verwenden. Dieses Labor wird im Rahmen des diesjährig gestarteten Automated-Train-Projektes (siehe [6]) zum Einsatz kommen.

Die Weiterentwicklung und die Wartung einer solchen Simulations- und Testumgebung stellt eine große Aufgabe dar. Die DB Netz AG und dSPACE sind daher



Abbildung 5:
Der simulierte Zug
BR 423 in AURELION

offen für weitere Partner aus dem Bahnbereich, die Interesse haben, die entwickelte Umgebung zukünftig als Basis für Integration und Test zu nutzen. ■

Lesen Sie auch

Technologiesprung für die Schiene der Zukunft

Deine Bahn 12/2022

Mit dem digitalen Bahnbetrieb in die Zukunft der Eisenbahn

Deine Bahn 9/2020

Projekt Zustandsüberwachung des Gleisumfeldes (ZuG)

Deine Bahn 1/2018

Referenzen

- [1] OCORA, „Open CCS On-board Reference Architecture – System Architecture (OCORA-TWS01-030 Ver 3.00),“ 2022.
- [2] C. Hauswald, D. Spiegel, D. Kreyenberg und A. Fiack: Digitale Schiene Deutschland testet erstmals sensorbasierte Wahrnehmungssysteme im Bahnbetrieb, Deine Bahn, April 2022.
- [3] dSPACE GmbH: Automotive Simulation Models, 2023. Online unter: https://www.dspace.com/en/pub/home/products/sw/automotive_simulation_models.cfm
- [4] DB Netz AG: Digitales Register - die „Single Source of Truth“ für Infrastrukturdaten für das vollautomatisierte Fahren. Online unter: http://digitale-schiene-deutschland.de/Digitales_Register
- [5] Unreal Engine: Unreal Engine - dSPACE drives advancements in autonomous vehicle testing, 2022. Online unter: <https://www.unrealengine.com/en-US/spotlights/dspace-drives-advancements-in-autonomous-vehicle-testing>
- [6] DB Netz AG: Deutsche Bahn und Industrie erproben vollautomatisiertes Fahren von Zügen, 5.7. 2023. Online unter: https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Deutsche-Bahn-und-Industrie-erproben-vollautomatisiertes-Fahren-von-Zuegen-10870974
- [7] DB Netz AG: Digitale Schiene Deutschland und NVIDIA arbeiten an einem digitalen Zwilling des Schienennetzes, 22.11.2022. Online unter: <https://digitale-schiene-deutschland.de/aktuelles/Digitaler-Zwilling>