

Definition von ATO-Betriebsbereichen als Grundlage von Testszenarien

Bisherige Ergebnisse und Ausblick zum DZSF-Forschungsprojekt „Systematisierung der Einsatzszenarien für ATO“

STEFAN FACH | FELIX ZÖLLNER | DANIEL SCHWENCKE

Das vom Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) beauftragte Projekt zielt auf die Übertragung der Methodik des szenarienbasierten Testens aus der Automotive-Domäne auf den automatisierten Bahnbetrieb (Automatic Train Operation, ATO). Die Definition von Betriebsbereichen (Operational Design Domain, ODD) für ATO-Systeme stellt eine wichtige Grundlage hierfür dar, da sie den Testraum begrenzt. Im nachfolgenden Beitrag wird insbesondere das bisher erarbeitete Vorgehen zur ODD-Definition beschrieben und ein Ausblick auf die gegenwärtig laufenden Arbeiten zur Szenarienableitung und zur Erstellung eines Tools zur Generierung konkreter Parameterwerte für Testszenarien gegeben. Im Projekt werden gezielt Ergebnisse aus dem Automotive-Bereich aufgegriffen, um diesen Erkenntnisvorsprung auf die Eisenbahn anzuwenden.

Ausgangslage

Die Einführung von ATO-Systemen in höheren Automatisierungsstufen (\geq GoA 3) bei Eisenbahnen nach Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) stellt hohe Anforderungen an die Systeme zur Umgebungswahrnehmung und damit verbunden an die Sicherheit und Nachweisführung des Gesamtsystems. Mit Wegfall des Triebfahrzeugführers (Tf) im Führerstand müssen automatisierte Systeme sämtliche betrieblichen und sicherheitsrelevanten Aufgaben übernehmen. Insbesondere die sensorbasierte Objekterkennung und -klassifikation, die heute maßgeblich auf KI-basierten Verfahren beruht, kann aufgrund ihrer mangelnden Nachvollziehbarkeit nicht mehr auf dem klassischen analytisch-argumentativen Wege abgesichert werden. Statt eines gestuften Validierungsansatzes (vom Software-Unit-Test bis hin zum Systemtest) wird für solche Systeme eine Validierung „von außen“ durch eine hohe Zahl von Verhaltenstests in denkbaren betrieblichen Abläufen/Situationen erforderlich. Dieser Ansatz wurde in den vergangenen Jahren als „szenarienbasiertes Tes-

ten“ insbesondere im Rahmen der PEGASUS-Projektfamilie im Automotive-Bereich entwickelt. Er sieht – ob der Vielzahl der Tests – die Simulation von Szenarien als wichtigste Säule der Validierung, ergänzt durch Fahrten in Testfeldern und in realen Betriebsumgebungen. Zusätzlich ist eine präzise Eingrenzung des zulässigen Betriebsbereichs eines Systems durch die Angabe einer „Operational Design Domain“ durch den Systemhersteller notwendig. ODD strukturieren den Parameterraum aus Infrastruktur, Aufgaben, Umwelt- und Betriebsbedingungen und bilden so die Grundlage, um Testfälle systematisch und unter Abdeckung des Testraums abzuleiten, den Sicherheitsnachweis zu führen und hochautomatisiertes Fahren zu ermöglichen.

Projektbeschreibung

Das Projekt entwickelt eine umfassende, bahnspezifische Methodik zur systematischen Ableitung, Strukturierung und Abdeckungsbewertung für hochautomatisierte ATO-Systeme. Zentrale Grundlage ist die Erstellung einer praxistauglichen ODD-Systematik, die den komplexen Bahnbetrieb mit seinen betrieblichen Aufgaben entlang von Infrastruktur, Umweltbedingungen und dynamischen Einflüssen strukturiert. Darauf aufbauend werden funktionale und logische Szenarien definiert, priorisiert und hinsichtlich ihrer Relevanz und Vollständigkeit analysiert.

Schließlich entsteht ein Software-Tool, das diese ODD-Systematik technisch umsetzt, Testfallmengen (d.h. Parameterwerte und somit konkrete Szenarien) generiert, Abdeckungsgrade prüft und Nutzer auf diese Weise bei der gezielten Ergänzung von Tests unterstützt. Eine Entwickler- und Nutzerdokumentation wird nachfolgende Weiterentwicklungen und Funktionsergänzungen des Tools ermöglichen.

Die fachliche Fundierung wird durch eine strukturierte Recherche von Forschungsliteratur, -projekten und Standard-Dateiformaten sowie durch Workshops mit Branchenexperten sichergestellt, in denen ODD-Strukturen, Szenarien und Modellierungsansätze validiert und weiter geschärft werden. Methodik und Tool werden einem mehrstufigen Validierungsprozess unterzo-

gen. Das Projekt schafft damit eine robuste Grundlage für zukünftige Zulassungsverfahren, erhöht die Vergleichbarkeit von Entwicklungsansätzen und ebnet den Weg für die sichere und skalierbare Einführung hochautomatisierter (GoA 3/4) Bahnsysteme.

Automatic Train Operation und Automatisierungslevel

ATO ist die automatisierte Betriebsführung von Eisenbahnen, hier mit dem Fokus auf Bahnen nach EBO. In Abhängigkeit vom realisierten Automatisierungslevel (Grade of Automation/GoA 0–4) werden Aufgaben, welche klassischerweise durch den Tf durchgeführt werden, vom Automatisierungssystem übernommen. GoA 0 bezeichnet den vollständig manuellen Betrieb, während Betrieb in GoA 1 durch Zugsicherungssysteme unterstützt wird. Ab GoA 2 übernimmt das ATO-System zentrale Fahrfunktionen wie Beschleunigen, Bremsen und das Halten der Geschwindigkeit; der Tf bleibt jedoch verantwortlich. GoA 3 ermöglicht einen fahrerlosen Betrieb zwischen den Halten, ergänzt durch eine Begleitperson (d. h. nicht notwendigerweise im Führerstand) für Notfälle. Ab diesem Automatisierungsgrad geht die Streckenbeobachtung bzw. Überwachung der Zugumgebung aus der Verantwortung des Tf auf technische Systeme über. GoA 4 steht für den vollautomatisierten Zugbetrieb, ohne dass Personal an Bord erforderlich ist. ATO-Systeme nutzen hierfür modulare Architekturen von Systemkomponenten und Sensorik zur Umfeldwahrnehmung. Als Sicherungssysteme werden bislang ETCS oder CBTC verwendet. Moderne Funkstandards (Future Railway Mobile Communication System, FRMCS) zeichnen sich als grundlegende Voraussetzung für Kommunikation und Datenübertragung ab. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad rücken sichere Entscheidungslogiken, präzise Lokalisierung und zuverlässige Rückfallebenen – etwa Remote Train Operation – in den Mittelpunkt.

Operational Design Domain

Die ODD [1] beschreibt den abgegrenzten Betriebsbereich, in dem ein automatisiertes System sicher funktionieren muss. Sie definiert alle relevanten Bedingungen an die Bahninfrastruktur, das Streckenumfeld, Betriebsregeln, Umwelt- und Wetterfaktoren

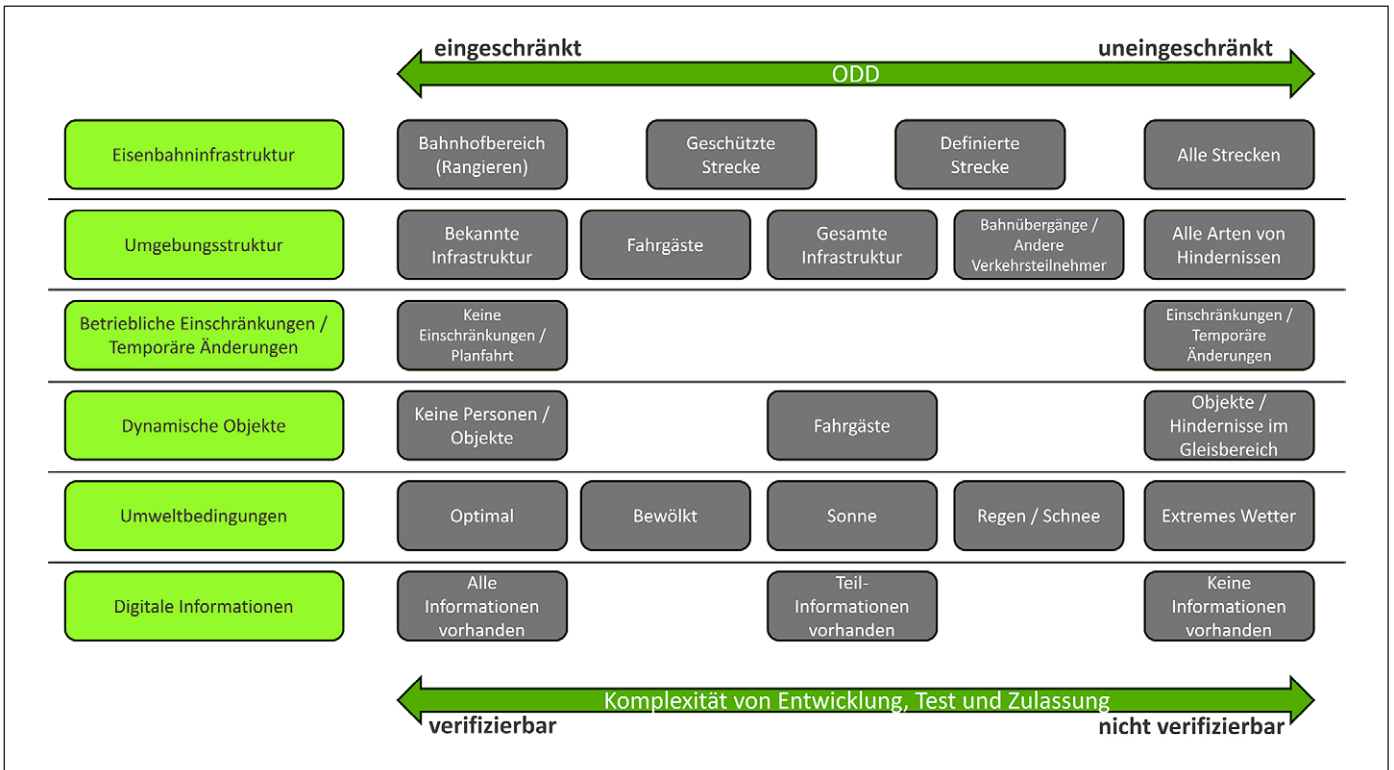


Abb. 1: Sechs Ebenen der Modellierung für eine mögliche ODD im Hinblick auf die Komplexität von Entwicklung, Test und Zulassung

Quelle aller Abb.: INAVET & DLR

sowie technische Abhängigkeiten. Damit bildet die ODD den strukturierten Rahmen, um Fähigkeiten und Grenzen eines ATO-Systems eindeutig festzulegen. Die ODD ist zentral für Entwicklung, Test, Sicherheitsnachweis und spätere Zulassung automatisierter Betriebssysteme. Die Beschreibung der ODD bringt die Herausforderung mit sich, einen geeigneten betrieblichen Rahmen zu definieren und gleichzeitig die Komplexität von Entwicklung, Tests und Zulassung auf ein beherrschbares Maß zu beschränken (Abb. 1).

ODD-Modellierung

Die Modellierung einer ODD dient dazu, den zulässigen Einsatzbereich eines automatisierten Bahnsystems strukturiert, vollständig und maschinenlesbar abzubilden. Ausgangspunkt ist eine Taxonomie, die alle relevanten Dimensionen des Bahnbetriebs umfasst – darunter Infrastrukturmerkmale, betriebliche Rahmenbedingungen, dynamische Objekte, Umwelt- und Wetterbedingungen sowie digitale Informationen (Abb. 2). Diese Ebenen wurden aus bestehenden Normen und etablierten Vorgehensweisen, etwa dem 6-Ebenen-Modell aus der PEGASUS-Projektfamilie [2] im Automotive-Bereich, abgeleitet und auf den Schienenverkehr übertragen. Jede Ebene wird in Parameter zerlegt, deren Wertebereiche, Partitionierungen und Abhängigkeiten systematisch beschrieben werden. Dadurch entsteht ein definierter Parameterraum, auf dessen Basis später für das betrachtete ATO-System relevante Szenarien und Testfälle abge-

leitet werden können. Die ODD-Modellierung umfasst zudem Regeln zur Vollständigkeitsprüfung und Versionierung, sodass Änderungen an Infrastruktur, Technik oder Betriebsverfahren konsistent nachvollziehbar bleiben. Ein wesentliches Ziel ist die Formalisierung in maschinenlesbaren Formaten wie XML, JSON oder ASAM OpenODD-Strukturen, um die Integration in Werkzeuge zur Testfallgenerierung und Validierung zu ermöglichen. So bildet die ODD-Modellierung die methodische Basis, um automatisierte ATO-Funktionen sicher, reproduzierbar und skalierbar im Bahnbetrieb einzusetzen. Die Validierung und Vollständigkeit der ODD wurde methodisch für die sechs Ebenen erarbeitet. Hierfür wurden für jeden Bereich zunächst Anforderungen definiert, welche erfüllt werden müssen, um eine vollständige Abdeckung zu gewährleisten. Im zweiten Teil wurden dann Nachweisquellen für den Abgleich benannt. Beispielhaft für die Ebene 1 (Eisenbahninfrastruktur) werden Streckentypen, Signal- und Sicherungstechnik, Infrastrukturelemente und Streckenparameter benannt. Als Nachweisquellen für Vorkommen und Häufigkeiten dienen digitale Streckendaten [3], Regelwerke (z. B. Ril 408, 483) [4, 5] oder Spezifikationen für Leit- und Sicherungstechnik. Durch die durchgeführte Analyse konnten bereits grundlegende Szenarien hergeleitet werden.

ODD-Dimensionierung

Die ODD-Dimensionierung beschreibt den Prozess, in dem die zuvor definierten ODD-Ebenen in konkrete, bewertbare und testrelevante

Wertebereiche überführt werden. Dabei werden Parameter festgelegt, deren Ausprägungen den gesamten zulässigen Betriebsbereich des ATO-Systems abbilden. Beispielsweise werden zulässige Niederschlagsmengen und Lichtstärken, aber auch regelwerksdefinierte Parameter wie die Spurweite inkl. Toleranzen definiert. Basis bildet hierfür u.a. die Spezifikation DIN DKE SPEC 99004:2025-05 [6] oder die EBO [7]. Die Dimensionierung erfordert eine Balance zwischen Präzision und praktischer Handhabbarkeit: Einerseits müssen die Wertebereiche so detailliert sein, dass sicherheitsrelevante Unterschiede im Bahnbetrieb abgebildet werden; andererseits darf die Granularität nicht zu einer unbeherrschbaren Anzahl möglicher Testfälle führen. Die Auswahl und Begründung der Parameter erfolgt durch die Kombination regulatorischer Vorgaben, bahnspezifischer Erfahrungswerte, realer Betriebsdaten sowie technischer Einschränkungen von Sensorik und Systemarchitektur. Die ODD-Dimensionierung bildet den Kern, aus dem funktionale, logische und konkrete Szenarien abgeleitet werden und ist die Grundlage, dass der definierte Testraum vollständig, konsistent und für spätere Zulassungsprozesse nachvollziehbar bleibt.

Ausblick – Szenarienbeschreibung und Tool-Entwicklung

Aktuell werden im Projekt in einem mehrstufigen Prozess in Anlehnung an den Automotive-Bereich [8] Testszenarien für ATO-GoA 3/4-Systeme abgeleitet:

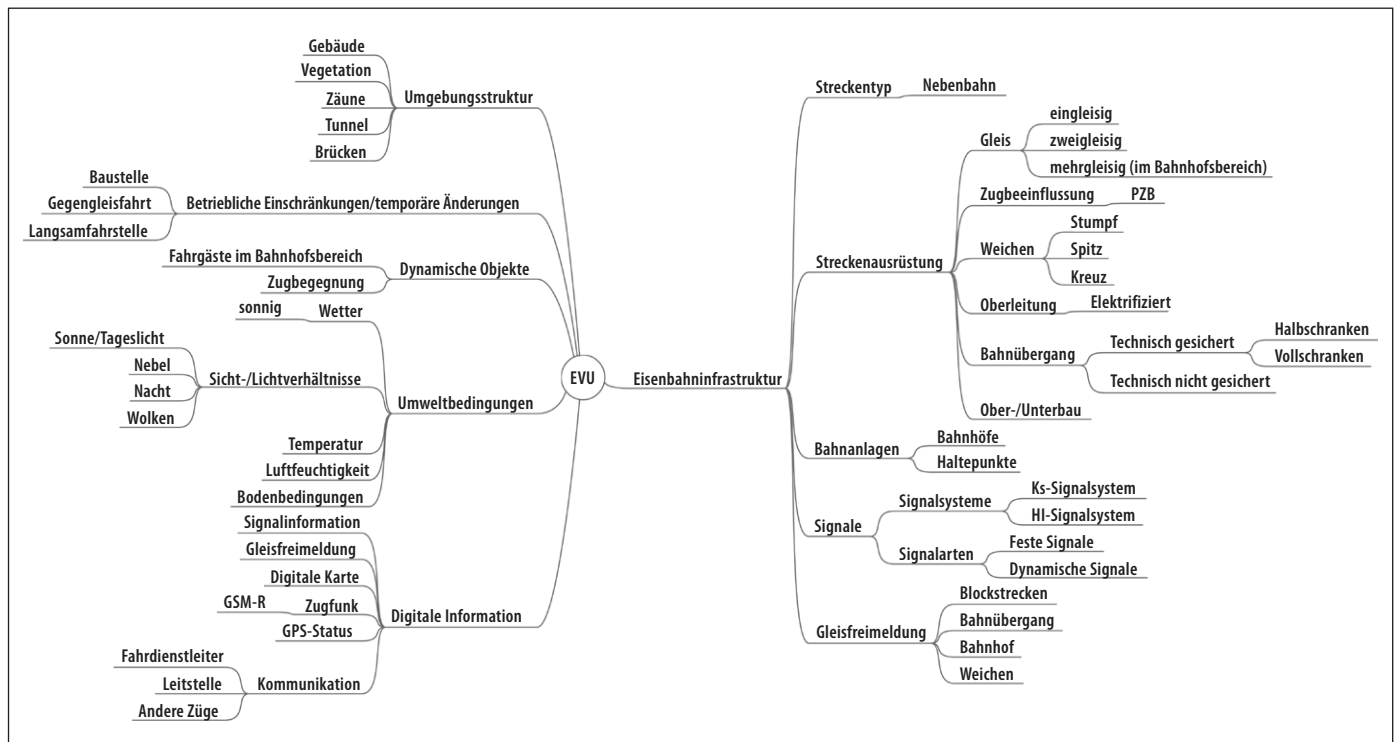


Abb. 2: Beispiel für die Anforderungen an eine ODD

- Funktionale Szenarien – Die Situationen, in denen ATO-Systemfunktionen zum Einsatz kommen können, werden identifiziert und zunächst in einem strukturierten textuellen Format als Abfolge mehrerer Szenen beschrieben. Dabei werden verschiedene Varianten der jeweiligen Szenarien betrachtet, die in unterschiedlichen Szenenabfolgen resultieren. Beispielsweise ist „Zufahrt auf Hindernisse“ ein funktionales Szenario, das u. a. Varianten für Hindernisse, die das Gleis überqueren und solche, die sich dauerhaft auf dem Gleis befinden, besitzt.
- Logische Szenarien – Die funktionalen Szenarienvarianten werden mit Parametern verknüpft, die das Szenario beeinflussen und die zugleich die Verknüpfung mit einer ODD eines konkreten ATO-Systems erlauben. Es werden Zuordnungen von Wertebereichen zu den Parametern vorgenommen, die jeweils ein logisches Szenario ergeben. Beispielsweise beeinflussen der Abstand zwischen Zug und Hindernis, die Hindernisgröße sowie die Wetterverhältnisse die Hinderniserkennung, sodass gewisse Wertekombinationen dieser und

weiterer Parameter logische Szenarien wie „Beinahekollision mit einem dauerhaften Hindernis“ und „Unvermeidliche Kollision mit einem dauerhaften Hindernis“ ergeben.

- Konkrete Szenarien (Testszenarien) – Es wird ein Softwaretool erstellt, das anhand von Vorgaben für die Abdeckung von Parametern bzw. Parameterkombinationen sowie anhand der Einschränkungen durch eine konkrete ODD verschiedene Sätze konkreter Parameterwerte für die logischen Szenarien generiert. Die vielen resultierenden Testszenarien sind schwerpunktmäßig für eine Ausführung in Simulationsumgebungen gedacht; sie sollen für die Zulassung, aber auch die Entwicklung von ATO-Systemen genutzt werden können.

Über alle Stufen hinweg wird zum einen die Ableitungsmethodik beschrieben. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der vollständigen und angemessenen Abdeckung möglicher Betriebszenarien eines ATO-Systems im Rahmen seiner ODD. Zum anderen wird die Methodik exemplarisch angewendet und kann so evaluiert und validiert werden. ■

QUELLEN

[1] DIN, „DIN DKE SPEC 99002:2025-03: Terminologie – KI in Bahnanwendungen; Text Englisch,“ 03 2025. [Online]. Available: <https://www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-dke-spec-99002/388693076>; letzter Zugriff 07/2025

[2] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) und andere, „PEGASUS - Schlussbericht für das Gesamtprojekt,“ 2020

[3] DB InfraGO AG, „Infrastrukturregister,“ [Online]. Available: <https://www.dbinfra.go.com/web/schiennetz/netzzugang-und-regulierung/infrastrukturregister>; letzter Zugriff 10/2025

[4] DB InfraGO AG, Ril 408 Fahrdienstvorschrift, Frankfurt am Main: DB InfraGO AG, 2024

[5] DB Netz AG, Ril 483 Zugbeeinflussungsanlagen bedienen, 2014

[6] DIN DKE SPEC 99004, „Spezifikation von ODD im Schienenverkehr,“ 2025

[7] Bundesamt für Justiz, „Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO),“ 2019

[8] Bagschik, G.; Menzel, T.; Reschka, A.; Maurer, M.: Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen. 11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren, Hrsg. Uni-DAS e. V., 2017, S. 125-135



Dipl.-Ing. Stefan Fach
 Bereichsleiter
 Vollbahn und Energieeffizienz
 INAVET – Institut für angewandte
 Verkehrstelematik GmbH, Dresden
 stefan.fach@inavet.de



Dipl.-Ing. Felix Zöllner
 Stellv. Bereichsleiter
 Vollbahn und Energieeffizienz
 INAVET – Institut für angewandte
 Verkehrstelematik GmbH, Dresden
 felix.zöllner@inavet.de



Dr. Daniel Schwencke
 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
 Institut für Verkehrssystemtechnik
 Deutsches Zentrum für Luft- und
 Raumfahrt e.V. (DLR), Braunschweig
 daniel.schwencke@dlr.de