

Innovationscampus Mobilität der Zukunft - Projektdaten (Abschlussberichte)

Institutionen: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institute oder Abteilungen: KIT-FAST

Postanschriften: KIT-FAST, Rintheimer Queralle 2, 76131 Karlsruhe

Projektleitende (Telefon, E-Mail): Tobias Hofmeier (tobias.hofmeier@kit.edu), Martin Cichon (martin.cichon@kit.edu)

Projekttitle: DEMO19, EduRail, Educational Railway Demonstrator for Future Mobility

Förderzeitraum des Vorhabens: 18.07.2024 – 31.12.2024

Abstract

Das Projekt EduRail wurde im Rahmen der Förderung „Mobiles Forschungslabor“ des ICM durchgeführt. Ziel dieser Förderung war es, potenzielle MINT-Studierende für technische und naturwissenschaftliche Studiengänge zu begeistern. Im Projekt EduRail wurde ein Demonstrator zur Automatisierung von Schienenfahrzeugen entwickelt. Dieser besteht aus einer mobilen Plattform, einem Leitstand zur Steuerung von Weichen und Signalen sowie zur Generierung von Fahraufträgen. Die Demonstration umfasst zwei Szenarien: eine Straßenbahn, die mit einem Bahnsteig und einem Bahnübergang interagiert, sowie eine Rangierlokomotive, die verschiedene Wagen ankoppelt und abkuppelt.

Das Projekt bietet sowohl einen klassischen Messebetrieb mit der Demonstration dieser Showcases als auch weiterführende praktische Angebote. Mit zusätzlichen Komponenten wie einem Rollenprüfstand und einem Drehgestell mit Motorcontroller und Hallsensor lassen sich spezifische Themenbereiche wie die Antriebsregelung vertiefen. Darüber hinaus ermöglicht das vorhandene LiDAR-Kit, Aspekte der Umfelderkennung hands-on zu erleben.

Ein besonderer Fokus des Projekts lag auf der interdisziplinären Zusammenarbeit zahlreicher technischer Disziplinen. Von klassischem Maschinenbau bei der Entwicklung der Fahrzeugkomponenten über die Implementierung von Regelungs- und Steuerungsalgorithmen bis hin zur Anwendung innovativer Methoden aus der Informatik und künstlicher Intelligenz wurden unterschiedlichste Ansätze integriert. So entstand ein praxisnahes und innovatives Lehr- und Demonstrationsangebot, das die Faszination und Herausforderungen der Bahnumtatisierung greifbar macht und gleichzeitig wichtige Impulse für die Forschung liefert.

1. Ausführliche Darstellung der Projektergebnisse und -erfolge

Das Projekt EduRail hat sich zum Ziel gesetzt, durch praxisnahe und interaktive Demonstrationen zentrale Aspekte moderner Bahntechnologien zu vermitteln. Im Mittelpunkt des Projekts stehen die Entwicklung und der Einsatz eines mobilen Forschungslabors, das aus vier zentralen Komponenten besteht: dem Modulträger, den Demonstratorfahrzeugen, dem Leitstand und den mit dem Aufbau durchführbaren Angeboten. Jede dieser Komponenten wurde so konzipiert, dass sie einen spezifischen Beitrag zur Darstellung und Vermittlung von Schlüsseltechnologien der Bahnsystemtechnik leistet.

Der Modulträger bildet die physische Basis für die Demonstrationen und sorgt für einen flexiblen und transportablen Aufbau. Die Demonstratorfahrzeuge simulieren praxisnahe Szenarien des Schienenverkehrs, wie automatisiertes Rangieren und Straßenbahninteraktionen. Der Leitstand dient als zentrale Steuerungseinheit und ermöglicht die Visualisierung sowie Kontrolle der Vorgänge in Echtzeit. Ergänzend dazu bieten die didaktischen Angebote einen interaktiven Zugang, der auf die Bedürfnisse der jeweiligen Zielgruppen abgestimmt ist – von Einsteigern bis hin zu Fortgeschrittenen.

Mit diesem integrativen Ansatz adressiert EduRail die drängenden Herausforderungen der Mobilitätsforschung und bietet eine Plattform, die sowohl technische Demonstrationen als auch interaktive Lehrangebote kombiniert. So wird nicht nur das Interesse an MINT-Fächern geweckt, sondern auch ein vertieftes Verständnis der Technologien gefördert, die die Mobilität der Zukunft prägen werden.

Im Folgenden werden die Anforderungen an die jeweiligen Module weiter spezifiziert und die erzielten Ergebnisse detailliert vorgestellt. Dabei wird auf die einzelnen Komponenten Modulträger, Demonstratorfahrzeuge, Leitstand und didaktische Angebote eingegangen.

Demonstratorfahrzeuge

Die Demonstratorfahrzeuge sind zentrale Elemente des Projekts EduRail und wurden entwickelt, um die Randbedingungen des Automatisierungsfalls "Fahren auf Sicht" praxisnah darzustellen. Dieser spezielle Einsatzfall ist in der Bahntechnik von besonderer Bedeutung, da hier die Fahrentscheidungen vom Fahrzeug selbst getroffen werden.

Bekannte Beispiele für das „Fahren auf Sicht“ sind Straßenbahnen, die in urbanen Umgebungen eigenständig Entscheidungen auf Basis ihrer Umgebung treffen müssen, sowie der Rangierbetrieb, bei dem Fahrzeuge Wagen ankuppeln, abstellen und innerhalb von Depots oder Rangierbahnhöfen manövrieren. Zudem beginnt jede Zugfahrt mit einer Bereitstellungsfahrt, die ebenfalls im Modus „Fahren auf Sicht“ erfolgt. Damit stellt dieser Betriebsmodus einen essenziellen Bestandteil des gesamten Zugbetriebs dar. Die Bedeutung und Herausforderungen des „Fahrens auf Sicht“ werden durch die Demonstratorfahrzeuge anschaulich vermittelt.

Die Automatisierung des Bahnbetriebs im Modus „Fahren auf Sicht“ befindet sich derzeit im Entwicklungs- und Forschungsstadium. Sie bietet die Gelegenheit, innovative Technologien direkt im mobilen Forschungslabor zu präsentieren und gleichzeitig zukünftige Forschende für die technischen und betrieblichen Herausforderungen zu sensibilisieren.

Die Forschungsprojekte Vollautomatische Abdrücklokomotive [DEMO19-1] und Rangierterminal 4.0 [DEMO19-2] präsentieren Lösungsansätze zur Umrüstung von Rangierlokomotiven für automatisierte Fahrten. Diese Systemtopologie soll in den Demonstratorfahrzeugen des Projekts anschaulich umgesetzt werden. Ergänzend zeigen die Arbeiten in [DEMO19-3] und [DEMO19-4] den skalierten Aufbau hochautomatisierter Bahnsysteme, auf deren Erkenntnissen die Entwicklung der Fahrzeuge für dieses Projekt basiert.

Für die automatisierte Entscheidungsfindung sind zahlreiche Sensoren, Aktuatoren und Recheneinheiten erforderlich. Diese Systeme benötigen in der Regel einen definierten Bauraum, der die Mindestgröße der Fahrzeuge vorgibt. Um maximale Synergien mit verfügbaren Zukunftsteilen zu erzielen, wurde die Spurweite G (45 mm) für den Aufbau gewählt.

Im weiteren Verlauf werden die Komponenten spezifiziert, mit denen die oben genannten Aufgaben in Bezug auf die Zielsetzung des mobilen Forschungslabors umgesetzt werden können. Neben der grundsätzlichen Funktionalität liegt der Fokus auf einer optimierten visuellen Darstellung und einer guten Zugänglichkeit der Elemente für Hands-On-Experimente. Basisfunktionalitäten, wie z.B. die Umfelderkennung, werden entsprechend dem Stand der Technik durch ein LiDAR-System realisiert. Zusätzlich können Kameradaten und Ultraschall-Distanzmessung die Datenlage für die Entscheidungsfindung verbessern. Für die Ortung, die im Bahnsystem üblicherweise punktuell über Balisen oder GNSS erfolgt, wird ein skaliertes Positionierungssystem auf Basis der Laufzeittriangulation mittels eines Ultraschallsignals eingesetzt, mit dem die Fahrzeuge ihre Position im Gleisplan berechnen können. Die Rechnerarchitektur wird ebenfalls dem Stand der Technik entsprechend auf einen Rechner zur Auswertung der Umfelderkennung (NVIDIA Jetson) und einen Rechner zur Entscheidungsfindung und Steuerung/Regelung der Aktuatoren (Raspberry Pi) festgelegt. Zusätzlich wird ein ESP32 zur Ansteuerung zusätzlicher Peripherie wie z. B. Displays eingesetzt.

Aufgrund der Vielzahl der Komponenten sind unterschiedliche Spannungsniveaus für die Energieversorgung erforderlich. Das Spur-G-System ist für den Betrieb mit 24 V Gleichspannung ausgelegt, daher wird diese als Ausgangsspannung verwendet, die über die Schienen verteilt und von den Drehgestellen abgenommen werden kann. Weiterhin wird die Spannung in der Elektronikebene (siehe Abb. DEMO19-1) und



Abb. DEMO19-1: Übersicht Elektronikebene

weiteren Elementen wie z. B. Motorcontrollern oder Spannungswandlern (12V und 5V) verteilt.

In der zweiten Ebene, der Controller-Ebene (siehe Abb. DEMO19-2), sind die Recheneinheiten untergebracht. Der offene Zugang ermöglicht eine flexible Verschaltung und erleichtert den Austausch von Softwareständen durch Austausch der Speichermedien.

Die Umfelderkennung auf dem Nvidia Jetson erfolgt auf Basis eines ROS2-Systems, das auch die native Integration des Unitree 4D-LiDAR L1 PM ermöglicht. Die Fahrentscheidung und die Verarbeitung der Positionsdaten erfolgt auf dem Raspberry Pi mittels eines Simulink Modells. Aufgrund der mobilen Anwendung wird für die Datenübertragung WiFi verwendet. Das mobile Forschungslabor ist dafür mit einem eigenen Router ausgestattet, um eine ausreichende Autarkie auch außerhalb der Universitätsnetzwerke zu gewährleisten.

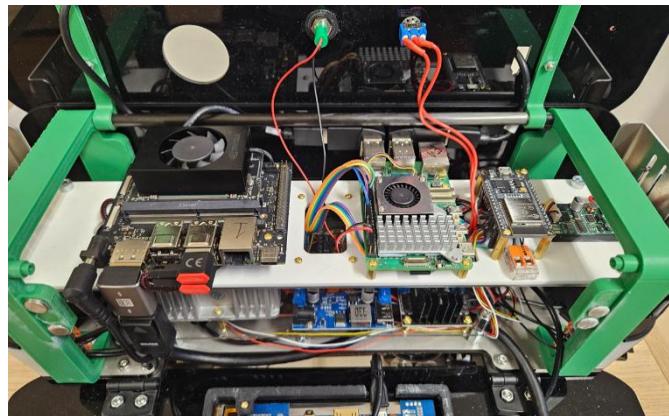


Abb. DEMO19-2: Übersicht Controllerebene

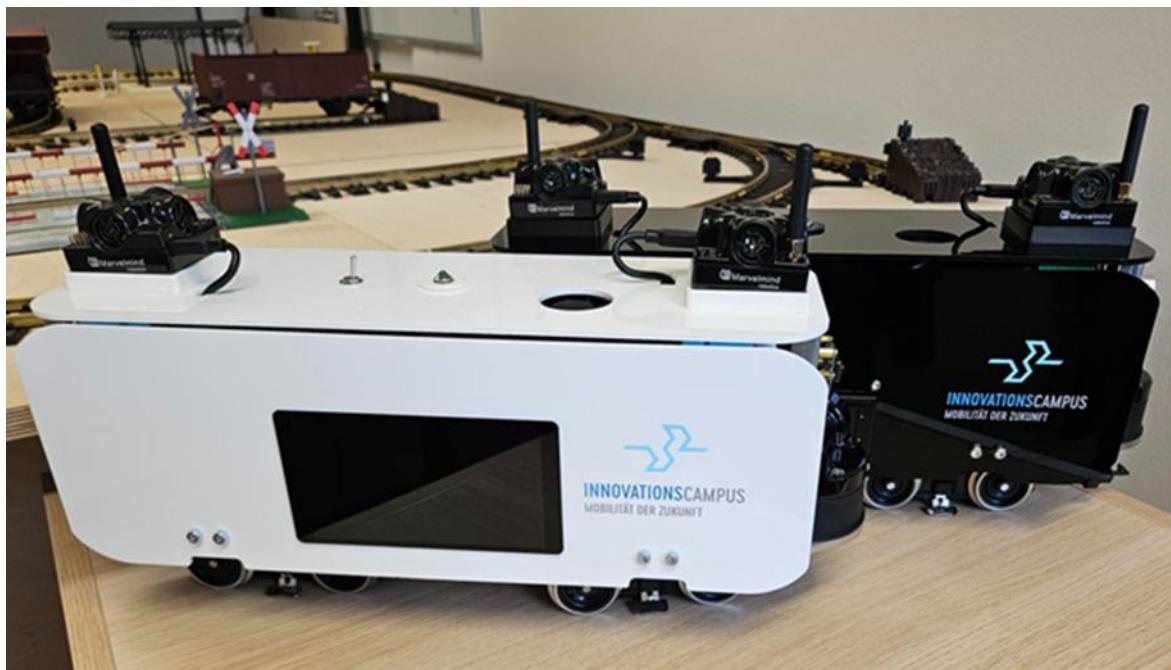


Abb. DEMO19-3: Demonstratorfahrzeuge „Straßenbahn“ (weiß) und „Rangierlokomotive“ (schwarz)

Die beiden aufgebauten Fahrzeuge sind in Abbildung DEMO19-3 dargestellt. Bei der Konstruktion wurde darauf geachtet, Synergieeffekte bei der Beschaffung zu nutzen. Zu diesem Zweck wurden die Fahrzeuge möglichst modular aufgebaut. Beide Fahrzeuge sind mit Umfelderkennungssensorik sowie zwei Marvelmind Ultraschall-Beacons zur Lokalisierung ausgestattet. Ein Display in der Seitenwand ermöglicht die Anzeige verschiedener Daten aus der Umfelderkennung, z. B. LiDAR-

Daten. Die Straßenbahn ist zudem mit einem zweiten Display auf der anderen Seitenwand ausgestattet, das einen Fahrgastrraum darstellt. Die Visualisierung erfolgt über die Anzeige verschiedener Bilder, den Fahrgastwechsel sowie den Zustand des Fahrgastrraums. Die Rangierlokomotive ist dagegen mit einem 20x4 LCD-Display ausgestattet, das die Fahrzustände des automatisierten Systems, wie z. B. "offline", "idle", "moving" oder "shunting", anzeigt. Darüber hinaus können auch Odometriedaten oder weitere Sensorstatus übertragen werden. An den Drehgestellen der Rangierlokomotive sind elektrisch betätigbare Rangierkuppler verbaut, mit denen Wagen an- und abgekuppelt werden können.

Die zusätzliche Sensorplattform an der Fahrzeugfront erlaubt die Montage einer Vielzahl weiterer Sensoren, wie beispielsweise einer Kamera oder eines Ultraschall-distanzmessers (siehe Abb. DEMO19-4). Dies gewährleistet eine modulare Weiterentwicklung des Aufbaus. Dieser kann abhängig von den jeweiligen Bedürfnissen, beispielsweise für Abschlussarbeiten oder weitere Forschungsvorhaben, angepasst werden.

Durch die Modularisierung der Fahrzeuge und die damit verbundene Senkung der Fertigungskosten war es möglich, zwei zusätzliche, weniger ausgestattete Fahrzeuge aufzubauen. Diese können im Rahmen von Hackathons oder Abschlussarbeiten verwendet werden. Der demonstrationfähige Zustand des mobilen Forschungslabors bleibt hiervon unbeeinträchtigt, während gleichzeitig ein weiterer Mehrwert für die Nachwuchsförderung entsteht.



Abb. DEMO19-4: Ansicht zusätzliche Sensorplattform

Modulträger

Der Modulträger nimmt im mobilen Forschungslabor EduRail eine zentrale Rolle ein. Im Transportmodus fungiert er als Lagerungseinheit für die verschiedenen Komponenten und gewährleistet deren sicheren Transport. Im aufgebauten Zustand spannt der Modulträger den Gleisplan auf und bildet damit die Grundlage für die Demonstrationen.

Der Gleisplan wurde so konzipiert, dass er eine möglichst große Vielfalt an Einsatzszenarien aus der Bahntechnik darstellt, insbesondere das Fahren auf Sicht thematisiert. Dazu zählen ein einfaches Rangierdepot, ein Bahnübergang sowie ein Bahnsteig. Diese Szenarien ermöglichen es, verschiedene Aspekte der Bahntechnologie praxisnah und verständlich zu demonstrieren.

Gleichzeitig wurde darauf geachtet, die eingenommene Fläche im aufgebauten Zustand möglichst gering zu halten, um den Aufbau und Transport zu vereinfachen. Zudem ist die Breite des Modulträgers im Transportmodus auf unter 90 cm begrenzt, damit es zu keinen Problemen mit Türen oder Aufzügen beim Transport kommt. Aufgrund der Körpergröße der Zielgruppe war zudem ein Optimum aus Funktionalität und Höhe im aufgebauten Zustand erforderlich. Dadurch bleiben die



Abb. DEMO19-5: Modulträger und Leitstand im aufgebauten Zustand

Sichtverhältnisse auf den Aufbau für alle Teilnehmenden auch bei geringer Körpergröße ideal.

Der Modulträger spannt im aufgebauten Zustand eine Fläche aus sechs einzelnen Platten auf (siehe Abb. DEMO19-5). Die resultierende Fläche für den Gleisplan beträgt ca. 1,80 m × 2,70 m. Die Platten und Stützen werden im Transportmodus vollständig im Modulträger verstaut, um einen unkomplizierten Transportprozess zu ermöglichen (siehe Abb. DEMO19-6).

Aufgrund der zwingend notwendigen Mobilität der Anlage sind Einschränkungen bei der Gestaltung des Gleisplans zu berücksichtigen. Nichtsdestotrotz konnten die verschiedenen Elemente wie z. B. ein Bahnsteig (siehe Abb. DEMO19-7), ein Bahnübergang (siehe Abb. DEMO19-8) und ein Depot (siehe Abb. DEMO19-5, mittig) wie ursprünglich geplant realisiert werden.

Im Modulträger sind das 24-V-Netzteil zur Spannungsversorgung der Anlage sowie der Wi-Fi-Router zur Kommunikation mit den einzelnen Komponenten verbaut. Die einzelnen Platten sind mit einem ESP32 zur Kommunikation mit dem Leitstand, sowie einer 24 V und 5 V Spannungsversorgung ausgestattet um die verschiedenen



Abb. DEMO19 - 6: Modulträger im Transportmodus

Komponenten zu betreiben. Der ESP32 ist in der Lage über die Ansteuerung von Relais die Weichen und Signale im Sinne der vom Leitstand übermittelten Fahraufträge zu stellen.

Für eine perspektivische Erweiterung der Anlage und die Nutzung in größeren Forschungsprojekten ist ein weiterer Gleisanschluss vorgesehen (siehe Storage 5 in Abbildung DEMO19-9).

Leitstand

Der Leitstand umfasst einen PC sowie Stauraum für den Transport der Fahrzeuge oder Umgebungselemente. Das Matlab-basierte Skript zur Verwaltung des mobilen Labors verfügt über eine grafische Benutzeroberfläche (GUI), über die die relevanten Informationen zentral ausgelesen werden können. Dazu zählen beispielsweise Daten der Fahrzeuge wie Position, Geschwindigkeit, aktuelle Tätigkeit oder der Zustand der einzelnen Sensoren (siehe Abb. DEMO19-9). Zudem werden im Leitstand über die GUI die verschiedenen Fahraufträge für die Fahrzeuge erstellt. Für die Erstellung der Fahraufträge wird über einen Suchalgorithmus die optimale Route zwischen der aktuellen Fahrzeugposition und dem Zielpunkt berechnet. Dabei werden die Länge des Fahrzeugs und die Befahrbarkeit von Weichen berücksichtigt. Ist ein Fahrtrichtungswechsel notwendig, wird der Fahrauftrag automatisch in sinnvolle Abschnitte segmentiert. Im ersten Schritt werden die Informationen an die Weichensteuerung übertragen, woraufhin der Fahrweg eingestellt wird. Im nächsten Schritt wird der Auftrag, bestehend aus Wegpunkten auf der Route, Geschwindigkeitsbegrenzungen und sonstigen Informationen, an das Fahrzeug übertragen. Das Fahrzeug empfängt den Auftrag und dekodiert daraus die notwendigen Informationen. Weiterführend wird auf Basis der Sensordaten (Position, Umfelderkennung, Odometrie) die Fahrentscheidung getroffen und ausgeführt. Währenddessen werden an die GUI fortlaufend Informationen über den Fahrzeugzustand und den Status des Fahrauftrags übertragen. Der Prozess veranschaulicht damit die relevanten Elemente hochautomatisierten Fahrens auf Sicht nach dem Stand der Technik und Forschung.

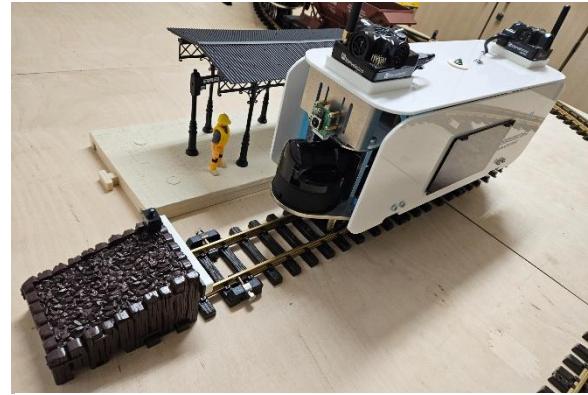


Abb. DEMO19-7: Interaktion Straßenbahn und Bahnsteig



Abb. DEMO19-8: Interaktion Straßenbahn und Bahnübergang

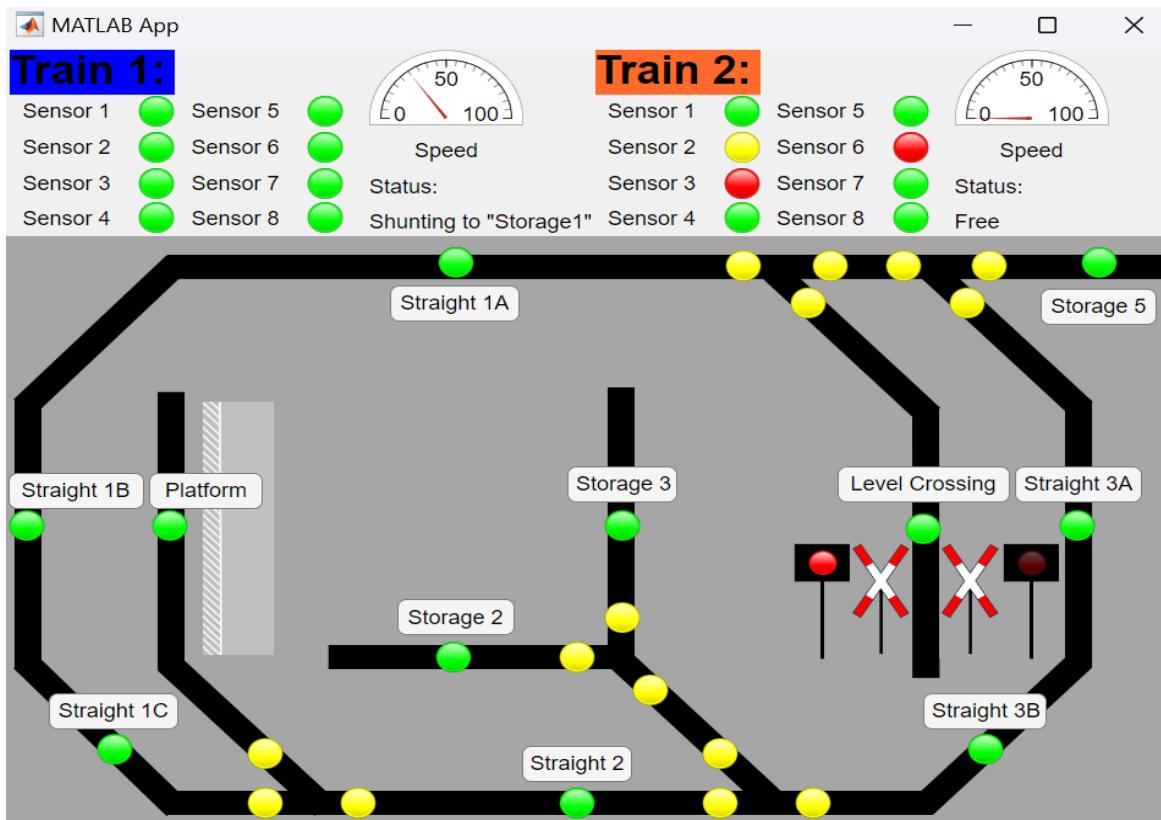


Abb. DEMO19-9: Ansicht GUI Leitstand

Zusätzliche Komponenten

Die in den Abbildungen DEMO19-10, DEMO19-11 und DEMO19-12 dargestellten Komponenten Rollenprüfstand, Drehgestell und LiDAR-Modul erweitern die didaktischen Möglichkeiten erheblich. Der Rollenprüfstand ermöglicht grundlegende Tests und Bewegungssimulationen, ohne dass reale Fahrtests notwendig sind. Das Drehgestell mit Hall-Sensor bietet präzise Messmöglichkeiten und kombiniert mechanische und elektronische Systeme für praktische Anwendungen. Das LiDAR-Modul in Verbindung mit einem Raspberry Pi erweitert das System um fortschrittliche Sensorik für Abstandsmessung und Umgebungserkennung.

Diese Komponenten bieten eine flexible, kosteneffiziente Lösung für Demonstrationen, die mit geringem Transportaufwand und reduzierter Funktionalität realisiert werden können. Sie ermöglichen sowohl Grundlagenvermittlung als auch die Umsetzung moderner Technologien wie Sensordatenauswertung und Automatisierung.



Abb. DEMO19-10: Rollenprüf-
stand



Abb. DEMO19-11: Drehgestell
mit Hall Sensor



Abb. DEMO19-12: LiDAR Mo-
dul und Raspberry Pi

Demonstrationsangebote und didaktische Möglichkeiten

Mit dem Aufbau können die in **Tab. DEMO19-1** gelisteten didaktischen Angebote umgesetzt werden.

Tab. DEMO19-1: Durchführbare Angebote

Format	Zielgruppe	Dauer	Inhalte
Messeauftritt	Allgemein	-	Allgemeine Demonstration automatisiertes Fahren Schienenfahrzeuge
Ausstellung/Führung	Sekundarstufe	90 min	Demonstration verschiedener Technologien. Je nach Vorwissen eingeschränkte Möglichkeiten zur Mitarbeit gegeben
Workshop	Universität	180 min	Workshop mit Elementen des Laborpraktikums https://www.fast.kit.edu/bst/929_17048.php

Literaturverzeichnis

- DEMO19-1 Forschungsprojekt VAL | Konzeption, Aufbau und betriebliche Erprobung der Vollautomatischen Rangierlok, Förderkennzeichen 52T20008KT
- DEMO19-2 Geischberger, J.; Falgenhauer, R.; Sinnemann, J.; Hanisch, R.; Grunwald, A.; Cichon, M. (2024). JadeWeserPort: Ergebnisse des Projektes RangierTerminal 4.0. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/382463876_JadeWeserPortErgebnisse_des_Projektes_RangierTerminal40
- DEMO19-3 Hofmeier, T.; Kleinlein, M.; Cichon, M. (2024). Development of Positioning Methods for ATO in a Scaled Model Environment. Proceedings of the Sixth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. [doi:10.4203/ccc.7.21.1](https://doi.org/10.4203/ccc.7.21.1)
- DEMO19-4 Hofmeier, T.; Cichon M. (2024). Introducing Scaled Model Development to on-Sight Automatic Train Operation. Proceedings of the 10th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. [doi:10.5220/0012691500003702](https://doi.org/10.5220/0012691500003702)