

Second Level KI in Weichen – Schlussbericht

Teil I

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Zuwendungsempfänger: <ul style="list-style-type: none">• Breuer Nachrichtentechnik GmbH• DLR Institut für KI-Sicherheit• RPTU Lehrstuhl für Funkkommunikation und Navigation | Förderkennzeichen: 19OI22016A/B/C |
| Vorhabenbezeichnung: SLKI – Second Level KI in Weichen | |
| Laufzeit des Vorhabens: Mai 2023 bis Juni 2025 | |
| Berichtszeitraum: Mai 2023 bis Juni 2025 | |

Schlussbericht - Kurzbericht

Im Projekt SLKI wurde ein sensorgestütztes, KI-basiertes Überwachungssystem für Elemente der Eisenbahninfrastruktur entwickelt und erprobt. Das Ziel des Projektvorhabens war es jegliche Arten von mechanischer Einwirkung auf die Gleisinfrastruktur durch intelligente Algorithmen zu detektieren, sowohl die Einwirkung durch die Nutzung als auch außerplanmäßige durch Umwelteinflüsse und/oder vorsätzliche Beschädigungen (Sabotage).

Somit mussten sowohl bekannte Zustände unterschieden werden können (Klassifikation) als auch bisher unbekannte Zustände (Anomalien) detektiert werden. Die Auswertung sollte durch ein anwendungsfalltrainiertes KI-Systeme erfolgen. Insbesondere sollten drei konkreten Anwendungsfällen betrachtet werden (siehe Abbildung 1):

- Sabotagedetektion
- Fehler / Auffälligkeiten an Zügen
- Gleisnutzung / Achszählung

| Anwendungsfall | Sabotage | Fehler an Zügen | Gleisnutzung |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Ziele | Manipulation am Gleis erkennen, Manipulation am Gleisbett erkennen | Flachstellen an Reifen detektieren, Achsfehlstellungen, Materialschäden an Reifen | Achszählung Zug-/Waggon-klassifikation Geschwindigkeit Gewichtsklasse |

Abbildung 1 Ziele der KI-Algorithmik laut Projektplan

Durch eine robuste Edge-/Far-Edge-Architektur sollte eine zuverlässige lokale Echtzeitverarbeitung sichergestellt, Bandbreitenanforderungen reduziert und eine hohe Ausfallsicherheit bei Störungen der Kommunikationsinfrastruktur gewährleistet werden.

Im Bereich der KI-basierten Datenauswertung und -analyse gab es in den letzten Jahren sehr viele Innovation und maschinelle Lernalgorithmen zur Klassifikation von Datensätzen wurden deutlich besser und ihr Einsatz durch Integration in verschiedene Trainings- und Inferenzframeworks deutlich effizienter. Darüber hinaus gibt es im Bereich der Diagnostik von Gleisen und Zügen eine Vielzahl von proprietären Systemen. Die meisten setzen gezieltes Messequipment wie spezielle Messzüge oder zusätzliche Sensorik ein. Ein Beispiel ist das im Projekt verwendete Überwachungssystem des Projektpartners Breuer Nachrichtentechnik GmbH. Es besteht aus Beschleunigungssensoren welche, während der Projektlaufzeit, an Weichen im Netz der deutschen Bahn verbaut wurden. Die Sensoren wurden im Projekt „Digitale Weiche 2.0“ entwickelt und eine Verwertung der Daten nicht nur für die prädiktive Instandhaltung, sondern auch zum Training von KI-basierten Algorithmen, um Rückschlüsse auf den Rolling-Stock zu geben, war zu Beginn des Projektes Neuland.

Die BREUER Nachrichtentechnik GmbH als Konsortialführer koordinierte die Aufgaben der Projektbeteiligten und stellte die Grundlagen für die Arbeit der Forschungsinstitute zur Verfügung. Insbesondere implementierte sie das 5G Reallabor, stellte aufbereitete Sensor- und Referenzdaten bereit und integrierte Algorithmen in die Anwendungsplattform.

Die erste Aufgabe des Instituts für KI-Sicherheit des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt im Hinblick auf ein funktionsfähiges KI-System, war deshalb die Planung und Implementierung einer Pipeline zur Bereitstellung und Vorverarbeitung der Sensordaten. Nur mit geeignet zur Verfügung stehenden und vorverarbeiteten Daten kann eine KI-basierte Trainings- und Ausführungspipeline zur Erfüllung der Projektziele aufgesetzt werden. In einem zweiten Schritt wurde dann, aufbauend auf die Vorverarbeitungspipeline, verschiedene KI-Algorithmen implementiert und getestet welche, eine Achszählung sowie eine Zugklassifikation anhand der Sensordaten durchführen konnten. Hiermit ist es nun möglich „bekannte“ Zustände zu erlernen und diese mit hoher Sicherheit zu klassifizieren. Ein weiteres Beispiel der entwickelten KI-Algorithmik ist auch ein Geschwindigkeitsschätzer und ein

Detektionsalgorithmus für abnormale Peaks in den Daten. Anhand dieser Informationen kann ein KI-Gesamtsystem trainiert werden, welches den „normalen Betriebszustand“ erkennen und „anormale Situation“, z.B. die Überfahrt eines Zuges mit beschädigten Reifen oder eine Sabotage, selbstständig dokumentiert und meldet.

Für die verschiedenen KI-Algorithmen wurden im Verlauf des Projektes symbolische sowie auch subsymbolische Methoden ausprobiert und analysiert. Anfangs wurden Clustering-Algorithmen wie K-means und Self Organizing Maps (SOM), verwendet um eine Vorsortierung der ungelabelten Datensätze zu erreichen. Für die eigentliche Klassifikation in die drei Zugklassen Fernzüge, Regiozüge und Güterzüge wurden tiefe neuronale Netze, wie z.B. das für die Analyse von Zeitserien optimierte mcfly Framework und die für das Erlernen von zeitlichen Zusammenhängen gut geeigneten recurrent neural networks (RNNs) verwendet.

Die Arbeiten der RPTU fokussierten insbesondere auf Kommunikationsarchitekturen, Energieeffizienz, Systemrobustheit sowie die Integration der Sensorik in ein 5G-basiertes Umfeld. Zu Projektbeginn wurde der wissenschaftliche und technische Stand umfassend erhoben. Dabei zeigte sich, dass bestehende zentrale Überwachungslösungen – wie etwa Digital Switch 2.0 – erhebliche Abhängigkeiten von Netzkonnektivität aufweisen und zugleich hohe Datenmengen verursachen. Moderne Entwicklungen im Bereich Edge-KI, darunter Online-Learning, Zeitreihenanalyse, Federated Learning und hardwarebeschleunigte KI-Verfahren, stellen eine geeignete Grundlage zur lokalen Verarbeitung dar. Ergänzend wurden aktuelle Konzepte zu Physical-Layer-Security betrachtet, um frühzeitige Angriffserkennung auf Funkschnittstellen zu ermöglichen. Der Projektverlauf umfasste drei zentrale Arbeitsschwerpunkte:

- (1) die Analyse bestehender Ansätze sowie die Entwicklung einer geeigneten, dezentral ausgerichteten Systemarchitektur auf Basis der Weichendichte im deutschen Schienennetz;
- (2) die Integration der Sensorknoten in das 5G-Campusnetz der RPTU, die Einrichtung eines offenen 3GPP-konformen Netzwerks mittels OpenAirInterface sowie umfangreiche Durchsatz- und Latenzmessungen;
- (3) die Untersuchung sicherheitsrelevanter Aspekte, insbesondere die Analyse möglicher Angriffsvektoren und die Erprobung physikalischer Kanalmerkmale zur KI-gestützten Authentifizierung.

Die wesentlichen Ergebnisse bestätigen die technische und wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit einer hybriden Architektur: Während zentralisierte Systeme vor allem aufgrund des hohen Energieaufwands für die Datenübertragung nachteilig sind, ermöglichen Edge-basierte und föderierte Verfahren eine deutliche Reduzierung der benötigten Ressourcen. Zudem zeigte die Anbindung der Sensormodule an das 5G-Campusnetz stabile Latenzen und ausreichende Durchsatzwerte für den Echtzeiteinsatz. Physical-Layer-Security-Ansätze erwiesen sich als praktikabel und liefern robuste Merkmale zur Detektion potenzieller Angriffsszenarien. Darüber hinaus wurde ein vielseitig einsetzbares Testbed aufgebaut, das zukünftig in Forschung und Lehre weiter genutzt wird. Insgesamt leistet das Vorhaben einen substanziellen Beitrag zur Weiterentwicklung energieeffizienter, resilienter und sicherer Edge-KI-Anwendungen für die Überwachung kritischer Infrastrukturen und schafft eine belastbare Grundlage für weitere Forschung und industrielle Umsetzung.