

Digitalisierung, Automatisierung und Anwendung maschineller Intelligenz bei Oberbaumaschinen

Bernhard Lichtberger und Heinrich Schmitzberger

1 Die Bahn im Zeitalter der Industrie 4.0

Zu den Technologien des Industriezeitalters 4.0 zählen das Internet der Dinge (IoT, Internet of Things), Big Data Analysis (BDA, Big Data Analytics), Cloud Computing (CC), Digitale Zwillinge (DT, Digital Twins), Cyber-physische Systeme (CPS, Cyber Physical Systems), Building Information Modeling (BIM) und Künstliche Intelligenzanwendungen (AI, Artificial Intelligence) [1]. Als 1956 die Künstliche Intelligenz (KI) offiziell zum Forschungsgebiet erklärt wurde, sah niemand voraus, welchen enormen Einfluss ihre Beschreibungs- und Vorhersagemöglichkeiten auf unser tägliches Leben nehmen würde. Parallel zu den kontinuierlichen Fortschritten in der KI setzten sich in den letzten Jahrzehnten Breitband-Netze und allgegenwärtige Konnektivität, eingebettete Sensoren, sowie Fortschritte bei Big-Data-Verarbeitungstechniken und Cloud Computing durch. Die gemeinsame Nutzung dieser Technologien führte zur Schaffung digitaler Zwillinge und künstlicher intelligenter virtueller Nachbildungen physischer Systeme [2, 4].

Der Digitalisierungsschub entspricht keiner kontinuierlichen evolutionären Weiterentwicklung, sondern verläuft sprunghaft und stellt die Eisenbahnen und ihre Zulieferfirmen vor eine komplett neue Herausforderung. Entsprechend groß sind die Anpassungsschwierigkeiten.

Die Computerspiele-Branche war ein Vorreiter der virtuellen Abbildung realer und fantasievoller Welten [3]. Diese Technologie wird heute in Mobile-Mapping-Systemen in der Bau- und Eisenbahnbranche genutzt. Aus aufgenommenen Datenpunkt-Wolken werden virtuelle Modelle extrahiert. Mit Hilfe von Mustererkennung werden Vektoren erkannt und gesetzt. So wird aus einer riesigen Datenpunkt-Wolke ein an Daten kleineres Modell erstellt.

Mit der Weiterentwicklung von Datenerfassungssystemen, Informations- (IT) und Netzwerktechnologien ist die Eisenbahnindustrie in das digitale Zeitalter eingetreten. Vor dem Hintergrund der Digitalisierung steht die Eisenbahn vor globalen Herausforderungen, die durch die rasanten Fortschritte bei digitalen Technologien entstehen. Mit der Weiterentwicklung des Maschinellen Lernens (ML) nehmen intelligente digitale Technologien eine zentrale Bedeutung in der künftigen Planung, dem Bau, Betrieb und in der Instandhaltung der Eisenbahn ein.

Die herkömmliche Gleisinstandhaltung entwickelt sich zur datengesteuerten und wissensgestützten intelligenten Gleisinstandhaltung. Die Echtzeitübertragung und -analyse von Daten aus dem gesamten Gleislebenszyklus zusammen mit der modellbasierten Simulation und Optimierung schafft Wissen, welches sich positiv auf alle Aspekte der Gleisinstandhaltung und -erneuerung auswirkt. Die cyber-physikalische Integration der Gleise ist eine wichtige Voraussetzung für intelligente Instandhaltung und Erneuerung und zugleich ihr Kernstück. Als bevorzugte Mittel einer solchen Integration bieten sich Cyber-physische Systeme und Digital Twins an [21].

2 Maschinelles Lernen – Künstliche Intelligenz

KI ist für die Datenanalyse eines der wichtigsten Werkzeuge.

Das ML ist eine prominente Anwendung der KI und verleiht Computersystemen die Fähigkeit, selbständig und ohne menschlichen Bediener zu lernen und zu handeln. ML-Systeme können sich an ihre Umgebung anpassen, aus ihren Erfahrungen lernen und ihr Verhalten automatisch optimieren. Dazu bedarf es keiner speziellen Programmierung.

ML basiert auf der Generierung von statistischen Modellen der abzubildenden Realität aus einer großen Anzahl von Beispieldaten und einem Satz von daraus selektierten Parametern (Merkmalen). Je nach Beschaffenheit der Daten und dem Ziel der ML-Anwendung kommt überwachtes (supervised), unüberwachtes (unsupervised), bestärkendes Lernen (reinforcement learning) oder eine Kombination aus diesen Verfahren zum Einsatz.

Beim Überwachten Lernen geht man von einer Datenbasis aus, die durch menschliche Experten vorab interpretiert wurde. Diese Daten werden zum Training eines Modells benutzt, das dann in einer zweiten Phase mit unbekanntem Daten konfrontiert wird. Das ML-System errechnet daraus eine Vorhersage für eine Zielvariable, die entweder diskret (Klassifikation) oder numerisch (Regression) sein kann. Im Gleisbau wäre eine gängige Anwendung der Klassifikation z. B. die Unterscheidung des vorgefundenen Schwellentyps (Holz, Beton, Stahl, ...) anhand von optischen Sensordaten. Eine Regressionsprognose kann die Anzahl noch sicher durchzuführender Beistellvorgänge vorhersagen, um eine Wartung des Stopfaggregats planen und Schäden daran vermeiden zu können. Solche und weitere Maschinenzustands-bezogene Prognosen sind in der Webplattform RaVeM der Fa. System7 rail GmbH (System7) realisiert (s. Kap.7).

Unüberwachte Lernverfahren sind dadurch charakterisiert, dass keine vorab interpretierten Daten zur Verfügung stehen. Algorithmen dieser ML-Kategorie können autonom, ohne menschliches Zutun, in einer großen Datenmenge versteckte Muster und Beziehungen erkennen. Dazu werden Eingangsdaten gruppiert und in Cluster unterteilt. Die resultierenden Cluster helfen menschlichen Experten dabei, unbekannte Zusammenhänge in den Daten festzustellen. Explizite Zielparameter können in diesem Verfahren a priori nicht festgelegt werden, sodass für den praktischen Einsatz meist zusätzliche Heuristiken herangezogen werden oder die Lernmethode mit anderen KI- und ML-Techniken kombiniert wird. Unüberwachte Lernverfahren kommen unter anderem bei der Korrelationsanalyse zum Einsatz, die auch im System7 Infrastrukturexpertensystem Verwendung findet, um den Einfluss einzelner Eingangsparameter (z. B. des Beistellwegs der Stopfaggregate) auf die Gleislagequalität festzustellen (s. Kap. 6).

Das bestärkende Lernen erfolgt auf Basis eines Bewertungssystems, das im Hinblick auf eine bestimmte Zielsetzung günstiges Verhalten belohnt und ungünstiges Verhalten bestraft. Das ML-System agiert autonom und versucht iterativ, durch Variationen des Verhaltens neue Lösungsstrategien zu entwickeln, um das Bewertungsergebnis zu maximieren. Es interagiert dabei mit einer Umwelt, die in Abhängigkeit des Anwendungsfalls bekannt oder unbekannt sein kann. Das Verhalten des Systems entspricht den Übergängen von einem Zustand in einen anderen zu diskreten Zeitpunkten. Jeder Übergang wird entsprechend einer Belohnungsfunktion bewertet. Vorteil dieser Methode ist, dass sie ohne Beispieldaten funktioniert und im Labor simuliert werden kann. Entscheidend ist, dass die Belohnungsfunktion dem Anwendungsfall gemäß abgebildet wird. Häufig eingesetzt werden bestärkende Lernverfahren in der Computerspiele-Branche oder im Zusammenhang mit autonomem Fahren. Während eines Gleisinstandhaltungseinsatzes kann diese Technik beispielsweise den Stopfzyklus optimieren oder im Umgang mit Hindernissen im Gleis unterstützen (s. Kap. 2.1).

Aktuelle Anwendungen des ML kombinieren diese drei Verfahrenstypen und gelangen mittlerweile zu großem Erfolg in Disziplinen, die bisher der menschlichen Intelligenz vorbehalten waren. Voraussetzung ist der Zugriff auf große Mengen qualitativ hochwertiger Daten, vorhandenes Expertenwissen und eine darauf aufbauende realistische Zielsetzung. Das durch die Firma OpenAI populär gewordene Large-Language-Model ChatGPT nutzt überwachtes und bestärkendes Lernen [22], um Texte zu generieren, die der Qualität eines von Menschen verfassten Werks kaum nachstehen. Die in der Medizin eingesetzten Bildgebenden Verfahren profitieren zunehmend von ML-Methoden [23]. Text-zu-Bild-Modelle wie Midjourney, DALL-E oder Stable Diffusion haben ein Stadium erreicht, das eine breite öffentliche Diskussion über kunstschaftende KI und deren Implikationen auf die Gesellschaft ausgelöst hat.

Bei all diesen Anwendungen kommen bestimmte Typen von Algorithmen zum Einsatz, die als Deep Learning – Tiefes Lernen bekannt sind. Tiefe Lernverfahren bauen auf künstlichen neuronalen Netzen (KNN) auf, die in Analogie zum menschlichen Gehirn aus „Neuronen“ bestehen. KNN-Neuronen sind wiederum in Schichten angeordnet, deren Leistungsfähigkeit mit der Anzahl bzw. Tiefe der Schichten einhergeht – daher kommt auch der Name des Algorithmus-Typs. Fast alle Algorithmen für Bestärkendes Lernen, und einige der Überwachten und Unüberwachten Lernverfahren nutzen Deep Learning zu einem gewissen Grad. Tiefes Lernen ist besonders effektiv bei der Erstellung von ML-Modellen für unstrukturierte Daten, wie z.B. Bilddaten oder Texte.

Während einer Gleisstandhaltung fallen zahlreiche strukturierte und unstrukturierte Daten über Gleislage, Bettung und den Stopfprozess an, die mittels einer Vielzahl von Sensoren aufgezeichnet und vorverarbeitet werden. Diese Daten werden je nach Zielsetzung mit Hilfe von verschiedenen Algorithmen und Verfahren analysiert. Das System7 Expertensystem verwendet beispielsweise eine durch kontinuierliche Forschung erweiterte und validierte Sammlung von Heuristiken [10], die dem Bedienenden detaillierte Einblicke in die physikalischen Auswirkungen des Gleisstandhaltungseinsatzes gibt und Rückschlüsse auf die Haltbarkeit der Gleislage zieht. Wesentlich dabei ist die Detektion und Interpretation von Anomalien, von Hinweisen auf Besonderheiten im Gleis, in der Bettung und im Planum, die einen Effekt auf die Gleislage haben können. Klassifikation (harte, normale oder weiche Schotterbettung), Regression (Gleisstabilitätsentwicklungsprognose) und Clusterbildung (Rückschlüsse auf Ursachen von Gleislagefehlern) zeigen dabei wertvolle Zusammenhänge auf. Als besonders herausfordernd gilt das Finden von versteckten Gesetzmäßigkeiten. Dazu kommen verstärkt KNN zum Einsatz. Um die erforderliche Datenmenge für performante ML-Modelle aufbauen zu können, wird die Herangehensweise verfolgt, sämtliche Eingangsdaten zusätzlich in Bildformate zu übersetzen. Dadurch kann die Mächtigkeit dieser Systeme voll genutzt werden, um Muster aufzudecken, die dem menschlichen Experten mitunter entgehen.

2.1 ML bei Oberbauinstandhaltungsmaschinen

Auf dem Stopfrobooter 4.0 von System7 werden ML-Methoden eingesetzt. Sie fußen auf folgenden Messwerten [21]:

- Daten der aktuell gestopften Schwelle (Verdichtbarkeit des Schotters, Eindringwiderstand, Bremsverzögerung der tauchenden Stopfaggregate, Schotterbetthärte, Hebewert, Richtwert, Verlauf der Verdichtkraft, Schienen- und Umgebungstemperatur, Rückfedern der Schiene, Stopfzeit bis zum Erreichen der optimalen Verdichtung, millimetergenaue Position der Schwelle im Gleis über RTK-GNSS usw.),
- bekannte Daten bereits zuvor gestopften Schwellen – Trend der einzelnen Parameter,

- Gleisfehlerverlauf (und Gleisfehler an jeder einzelnen Schwelle) in Höhe, Richtung und Querröhe vor dem Stopfen (durch Vormessung oder eigene Maschinenmessfahrt mit nachfolgender automatischer Optimierung),
- verbleibender Gleisfehlerverlauf nach der Stopfung durch Abnahmemessung mit einem inertialen Navigationssystem und
- Informationen über Hindernisse, Schotterbettprofil, Schienenbefestigung und Lage von Weichenelementen, Verlauf der Schienen, Position der Schwellen und des Herzstücks in Weichen.

Aus den absoluten Messwerten an einer Schwelle im Vergleich zum Trend der vorangegangenen Stopfungen wendet der Lernalgorithmus verschiedene Strategien an: Doppelstopfen, Überheben, Stopfpickel weiter öffnen, um mehr Schotter unter die Schwelle zu befördern und zu verdichten. Automatisch passt er die Senkgeschwindigkeit des Stopfaggregates an die Schotterbettverhältnisse an, Stopfdruck und Stopfzeit werden automatisiert eingestellt. Der Vergleich der Gleisfehler vor und nach dem Stopfen ist ein Maß für den Erfolg der Maßnahmen, auf dessen Grundlage sich das Lernprogramm selbst modifiziert.

2.2 ML auf Basis optischer Daten

Im Zuge der Automatisierung des Gleisbaubetriebs drängt sich die Nutzung von ML-Verfahren auch für optische Eingangsdaten auf. Die Erkennung und Positionierung interessanter Objekte in einem Raumkoordinatensystem ist für vielerlei Einsatzgebiete relevant. Derlei Objekte können beispielsweise Weichenelemente, Schwellen und sogar Schottersteine sein. In einem Forschungsprojekt mit dem Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien der TU Wien [24] hat sich System7 mit den Befestigungsmitteln für Schwellen auseinandergesetzt. Im Vordergrund dieser Anwendung stand zunächst die Klassifikation der Befestigungsmittel. Dabei wurden fünf Klassen identifiziert (Abb. 1 u. 2): (1) Direkte Befestigung mit einer Schraube, (2) Direktbefestigung mit zwei Schrauben, (3) Spannklemme mit einer Schraube, (4) Spannklemme mit zwei Schrauben, und (5) kein Befestigungsmittel.



Abb. 1: Aufnahmen der Befestigungsmittel-Klassen 1 bis 3

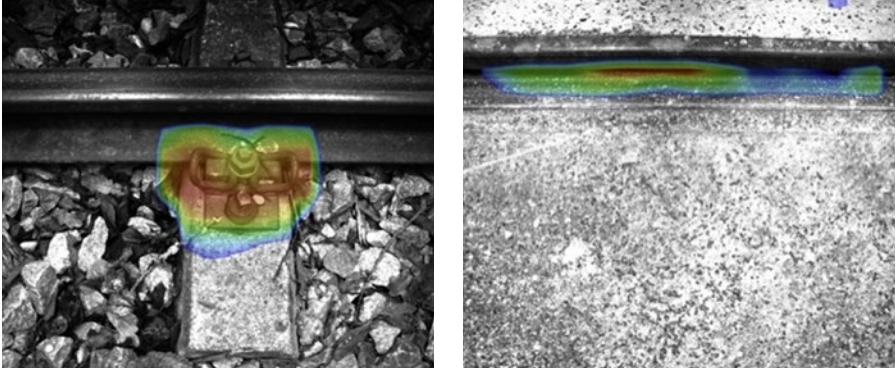


Abb. 2: Aufnahmen der Befestigungsmittel-Klassen 4 und 5

Es wurden verschiedene Messfahrten zu Tages- und Nachtzeiten mit Geschwindigkeiten von bis zu 10 km/h durchgeführt. Ob der Zielsetzung wurde ein überwachtes Lernverfahren eingesetzt. Zu diesem Zweck wurden die aufgezeichneten Daten in einen Trainingsdatensatz und einen Testdatensatz aufgeteilt. Die Bilder des Trainingsdatensatzes wurden von einem Experten den festgelegten Klassen zugeordnet und in weiterer Folge mittels Datenaugmentierung (i.e. dem Drehen, Spiegeln, Skalieren, und Verzerren der Ursprungsbilder) erweitert, um die Datenmenge zu erhöhen. Auf diese Daten wurde ein Künstliches Neuronales Netz aufgebaut, das auf dem Testdatensatz eine Klassifikationsquote von 99,7 % erreichte.

Auf dem Klassifikations-Modell aufbauend wurde in einer zweiten Anwendung des Tiefen Lernens ein System entworfen, das die Lokalisierung der zentralen Schraube der Befestigungsmittel im Live-Bild detektiert (Abb. 3).

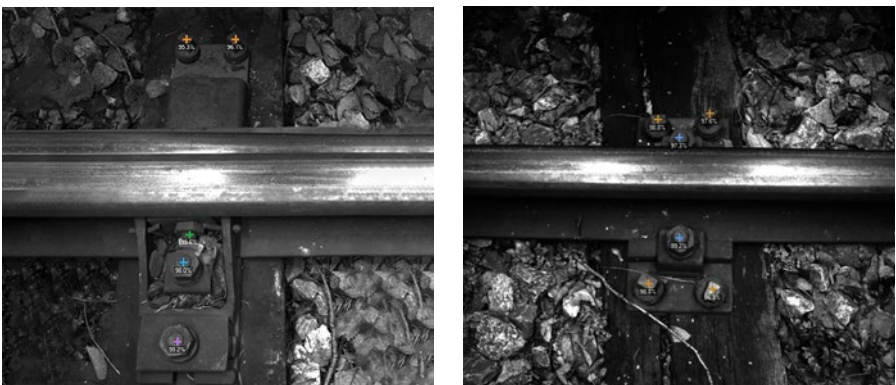


Abb. 3: Lokalisierung der Schraube der Schienenbefestigung

Aus der relativen Lage der zentralen sowie weiterer Schrauben und der Klasse des Befestigungsmittels wird die Lage und Ausrichtung der Schwelle im Bild abgeleitet. Kennt man weiter die Position des im Live-Betrieb aufgezeichneten Bildausschnitts in Relation zur aufzeichnenden Stopfmaschine und deren Arbeitsaggregaten, lässt sich damit die Vorfahrt zur nächsten Schwelle automatisch steuern.

Zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Artikels befindet sich dieses Modell noch in der Erprobungsphase. Erschwert wird der beschriebene Anwendungsfall durch die in der Praxis häufig anzutreffende Situation, dass die Befestigungsmittel aufgrund von Verschmutzungen, Hindernissen, zu hoher Einschotterung oder anderen Störeinflüssen im Videobild nicht eindeutig lokalisiert werden können. Für Systeme des ML bedeutet dies, dass das zugrundeliegende Modell um die neuen Bilddaten, die zuvor im Modell noch unterrepräsentiert waren, erweitert werden muss. Das System meldet in solchen Fällen eine Unterschreitung der Erkennungsqualität.

Weitere Herausforderungen umfassen die Kompensation von wechselnden Lichtverhältnissen und Witterungseinflüssen, die Wahl angemessener Sensorhardware (Kamera-Typ, Auflösung, Ausrichtung und Aufnahmegeschwindigkeit) und die automatisierte Verarbeitung sowie Übertragung großer Datenmengen. Diese Aspekte wurden individuell für den Aufbau auf dem Stopfroboter 4.0 gelöst und sind für andere Einsatzzwecke, wie sie sich z.B. in Verbindung mit der Schotterplaniermaschine Ballast Robot 4.0 ergeben, entsprechend anzupassen.

3 Die Ausführung konventioneller Stopfmaschinen

Konventionelle Stopfmaschinen entsprechen häufig nicht den heute üblichen Anforderungen der Digitalisierung. Exzenterwellenstopfantriebe erzeugen die Vibration über elektrisch oder hydraulisch angetriebene Exzenterwellen. Die Verdichtamplitude ist über die Exzentrizität mechanisch fix vorgegeben. Die Stopffrequenz wird über die Drehzahl der Antriebsmotoren eingestellt. Die einzelnen rotierenden Stopfantriebe einer Stopfmaschine sind schwer zu synchronisieren. Als Folge treten Schwebungen auf, die sich als Anregungen akustisch und vibrierend störend in den Arbeitskabinen bemerkbar machen. Gestopft wird nach fest vorgegebenen Zeiten. Die Einstellung der Stopfparameter erfolgt subjektiv durch den Bediener.

Die Steuer- und Messeinrichtungen bestehen aus zwei gespannten Stahlseilen für die Längshöhen und einer Mittelsehne für die Richtung (Pfeilhöhe). Die Messgrößen werden über Mitnehmer und damit verbundenen Drehgebern (meist analoge Potentiometer) erfasst, die die Position des Stahlseiles abtasten. Stahlseile hängen je nach Spannkraft durch. Sie schwingen und reißen, wenn sie überbeansprucht werden und schränken die Bauräume der Stopfmaschine ein.

Diese Abtastung der Gleislage über Sehen führt zu einer von der Fehlerwellenlänge nach Phase und Verstärkung abhängigen Übertragungsfunktion [8]. Das Maschinenmesssystem wird periodisch aufwendig durch spezialisiertes Personal des Herstellers kalibriert.

Die Querneigung wird über physikalische Pendel (meist mit analogen Potentiometern) erfasst, welche regelmäßig zu kalibrieren und zu warten sind. Vibrationen wirken sich nachteilig auf die Genauigkeit der Pendel aus, ebenso wie Bogenfahrten, bei denen wegen der Zentrifugalbeschleunigung von der Geschwindigkeit und dem Radius abhängig Überhöhungsfehler auftreten. Messfahrten sind daher mit Geschwindigkeiten von <5 km/h begrenzt.

Konventionelle Stopfmaschinen weisen weder WLAN (Wireless Local Area Network), noch GNSS (Global Navigation Satellite System) zur Positionsbestimmung und kein Übertragungsmodem für Daten auf. Die Wartung der Maschinen erfolgt nach fest vorgegebenen Intervallen oder korrektiv nach dem Ausfall von Komponenten.

4 Der voll digitalisierte Stopfroboter 4.0

Der Stopfroboter 4.0 von System7 (Abb. 4) ist eine voll digitalisierte Stopfmaschine neuester Bauart.



Abb. 4: Stopfroboter 4.0

Herausragendes Merkmal ist der vollhydraulische Stopfantrieb. Beistellbewegung und Vibration werden elektronisch digital vorgegeben und durch ein Hochleistungsventil erzeugt. Verschleißanfällige Bauteile wie Exzenterwelle, Wälzlager, Pleuel, Schwungscheiben und Antriebsmotoren entfallen. Das erhöht die Lebensdauer der Stopfaggregate bei gleichzeitig geringer Wartung und niedrigen Life Cycle Kosten. Stopfamplitude und Verdichtfrequenz sind frei einstellbar. Über Drucksensoren und in den Antrieb integrierte Wegsensoren wird der Verlauf und die Größe der Verdichtkraft gemessen.

Aus dem reinen Arbeitsaggregat wird ein die Schottereigenschaften erfassendes Messgerät. Aus dem Verdichtkraftverlauf ermittelt die Maschine automatisch die optimale Verdichtung. Diese ist erreicht, wenn der Schotter in den Schwellenvorkopf abfließt. Der Verlauf der Verdichtkraft erlaubt die Angabe von Schotterbetthärte, Verdichtbarkeit, Steifigkeit und Dämpfung des Schotters.

Der 2014 erfolgreich in den Markt eingeführte vollhydraulische System7-Stopfantrieb revolutionierte das Stopfen [5]. Das mehr als 60 Jahre alte Stopfen mit Exzentervibration wurde durch ein messbasiertes, automatisches, auf den Schotterzustand abgestimmtes Verdichten abgelöst. Vibration und Beistellen werden hydraulisch erzeugt, elektronisch geregelt und gesteuert. Druck und Beistellweg werden kontinuierlich ermittelt. Daraus werden Schotterbetthärte, Schotterbettsteifigkeit, Schotterdämpfung und Verdichtkraft gemessen. Jeder einzelne Stopfantrieb wird unabhängig geregelt. Die Belastung des Schotters durch die Stopfung wird auf das Mindestmaß begrenzt. Mit kontaktlosen, in den vollhydraulischen Stopfantrieb integrierten Wegsensoren wird der Beistellweg und die Vibrationsamplitude geregelt und gemessen. An jedem Stopfantrieb bestimmen Drucksensoren die Verdichtkraft. Der Kraftverlauf erlaubt die optimale Verdichtung an jeder Schwelle durch unabhängigen Beistellzylinder. Die Folge ist ein optimal verdichtetes Gleis mit geringen Steifigkeitsschwankungen. Automatisch wird ein größtmöglicher tragender verdichteter Bereich unter den Schwellen erzeugt.

Eine Besonderheit der auf Messungen basierenden schotterzustandsorientierten System7-Automatikstopfung ist die Vibrationssteuerung jedes einzelnen Pickels. Diese wird nach Erreichen der optimalen Verdichtung abgestellt, der Pickel hält statisch Gegendruck aufrecht. Bei Erreichen der optimalen Verdichtung aller Pickel werden diese nicht vibrierend geöffnet und gehoben.

Vorteilhaft ist nicht nur das Erzielen des Optimums für jeden einzelnen Pickel, sondern auch, dass der verdichtete Raum nicht durch Weitervibrieren aufgelockert wird. Ergebnisse und Messungen in England weisen eine deutliche Verlängerung der Instandhaltungszyklen, eine Vergleichmäßigung und Erhöhung der Verdichtung nach [5, 21]. Über das Messgerät „Vollhydraulisches Stopfaggregat“ verfügt die Maschine über ein Sensorium, welches es ihr erlaubt, die Stopfparameter, wie Stopfzeit, Stopfdruck, Vibration, Tauchgeschwindigkeit etc., automatisch einzustellen und an die jeweiligen Erfordernisse anzupassen – ein bedeutender Schritt Richtung Autonomie.

Abb. 5 zeigt beispielhaft ein Split-Head-Weichenstopfaggregat mit vollhydraulischem Stopfantrieb, integriertem Weg- und Drucksensoren zum Messen von Verdichtweg und Verdichtkraft. Kennzeichen des vollhydraulischen Stopfantriebs ist eine erheblich geringere Lärmentwicklung [6] und Staubbelastung [7]. Da für den Pickelantrieb weniger Energie benötigt wird, ist der Ausstoß an CO_2 um 35 % geringer als bei konventionellen Maschinen. Typische Stopfzeiten bei optimaler Verdichtung liegen statistisch um

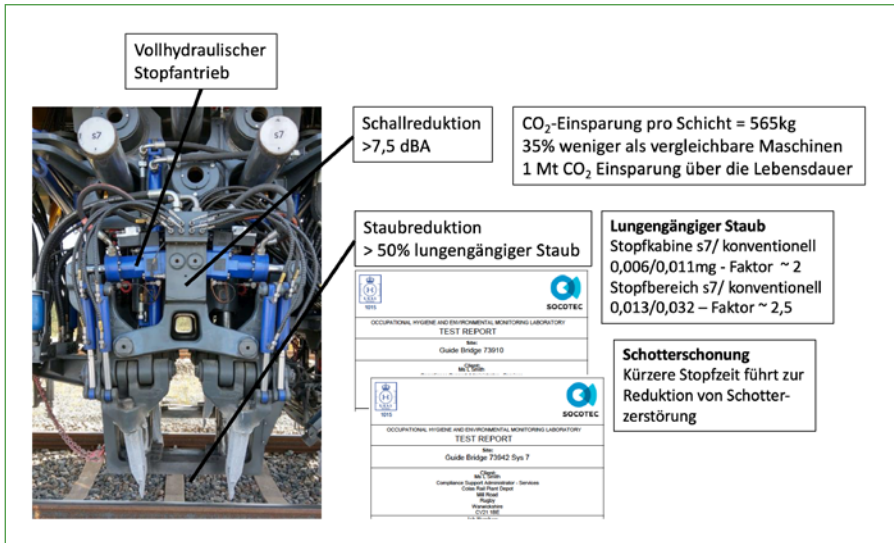


Abb. 5: Split-Head-Weichenstopfaggregat

0,7-0,8 s verteilt. Da bei der Automatikstopfung größere und optimale Verdichtkegel unterhalb der Schwelle erzeugt werden, steigt die Haltbarkeit der Stopfung verglichen mit konventionellen Exzenterantrieben durchschnittlich um 30 % [8]. Umfangreiche Studien durch Network Rail im Vereinigten Königreich wiesen nach, dass sich die Gleisverschlechterungsrate bei ca. 50 % aller gestopften Abschnitte verringert, bei den anderen gleichbleibt [9]. Die elektronische Ansteuerung der einzelnen Stopfaggregate erfolgt exakt synchron, es treten keine störenden Schwebungen auf.

4.1 Der Digitale Zwilling einer Stopfmaschine

Abb. 6 zeigt den Stopfroboer 4.0 in der realen und der virtuellen Welt. Die Maschine erfasst und liefert Sensordaten über ihren Zustand und die Steuer- und Regelvorgänge an den virtuellen Zwilling. Dieser analysiert die Daten, verarbeitet sie, leitet daraus Maßnahmen zur prädiktiven Instandhaltung der Maschine ab und liefert Informationen an die Maschine zurück. Die von der Stopfmaschine erfassten Maschinen- und Gleisdaten werden analysiert. Der Digitale Zwilling (DT) leitet mit Hilfe von ML-Methoden Aussagen über den Zustand des Gleises und empfohlene Maßnahmen zu dessen Optimierung ab. Der DT kann bei Instandhaltungsmaschinen zur Beurteilung der Infrastruktur und der Steuerung optimaler Gleisinstandhaltung, angepasst an die lokalen Eigenschaften, genutzt werden. Er sagt zudem das Verhalten und den Verschleiß der Maschinenaggregate voraus.

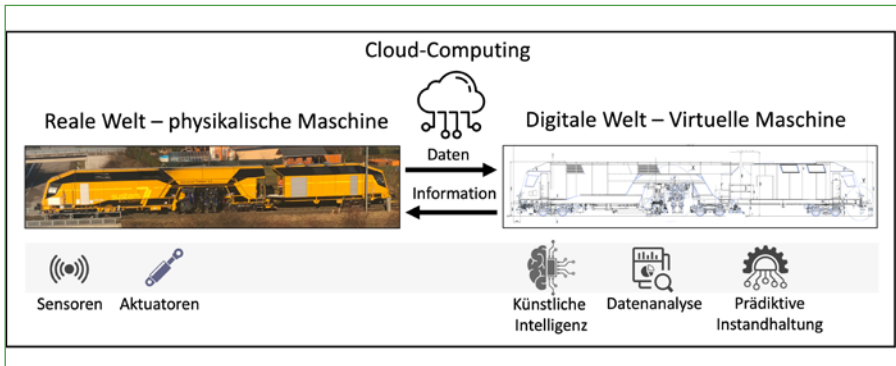


Abb. 6: Eigenschaften eines Digitalen Zwillings

Quelle: [17]

Der Stopfroter 4.0 ist, entsprechend dem Stand der Technik, in 3D-CAD-Technik konstruiert und entwickelt. Seine Bauteile und Aggregate sind als DT voll animierbar vorhanden. Gleichzeitig ergänzen elektronische Algorithmen und erfasste Bewegungen mit der durch den vollhydraulischen Stopfantrieb aufgenommenen Schotterbettdaten und den exakten mit der inertialen Navigationseinheit gemessenen Gleisgeometriedaten das virtuelle Modell aus dem Blickwinkel der Physik.

System7 entwickelte ein Simulationsprogramm bei dem die Daten der zu bearbeitenden Strecke eingelesen und die prognostizierten Resultate ausgegeben werden können. Das weitere Vorantreiben des Modells wird in Zukunft eine gezielte Arbeitsvorbereitung und die Vorhersage der Ergebnisse der Stopparbeit erlauben. Dies ermöglicht im Vorfeld eine Optimierung der Deep-Learning-Algorithmen ohne realen Einsatz der Maschinen.

4.2 Das digitale optische Messsystem OMS

Der Stopfroter 4.0 verwendet keine üblichen Stahlsehn konventioneller Maschinen, sondern ein patentiertes optisches Messsystem mit hochauflösenden schnellen Digitalkameras mit Bildauswertung und LED-Sendeeinheiten. Das System ist fehlertolerant und selbstüberwachend und misst gleichzeitig Richtung, Höhe und die Querhöhen an allen drei Messwagen. Am hinteren Ende befindet sich der in Abb. 7 eingezeichnete inertielle Navigationsmesswagen. Kennzeichnend ist neben der Abtastung der Längshöhe beider Schienen, der Richtung und der Querhöhe (fünf Freiheitsgrade) die inertielle Messeinheit.

Die inertielle Navigationsmesseinheit [8] hat sich in der Luftfahrtindustrie und nunmehr auch vielfach bei System7-Instandhaltungsmaschinen bewährt.



Abb. 7: Optisches Messsystem mit fehlertolerantem selbstüberwachendem Bildauswertungssystem für Höhe, Richtung und Überhöhung

4.3 Die Automatisierung der Hebewerkzeugwahl

Die Komplexität von Weichen erfordert spezielle Einstellungen der Stopfaggregate, insbesondere beim Stopfen im Abzweigbereich mit der Zusatzhebung und dem Stopfen des Abzweiges mit einem Splithead-Stopfaggregat. Neben der Rollzange kommt bei beengten Verhältnissen der Hebehaken zum Einsatz. Über dem Hebe-Richt-Aggregat vorlaufend messende Laserscanner wird die Lage der Schienen, Schienenbefestigungen, Schwellen und Hindernisse gemessen. Die AHRK (Automatische Hebe-Richt-Kontrolle) trifft automatisch die Hebewerkzeugwahl, gibt den Angriffspunkt an der Schiene (Kopf oder Fuß) vor und verfährt das Aggregat automatisch in Längsrichtung, damit der Haken, wenn notwendig, im Zwischenfach am Schienenfuß angreifen kann.

Abb. 8 zeigt eine mit dem AHRK gescannte Weiche. Die Lage der Schwellen und der Weichenelemente treten in der Computerauswertung deutlich hervor.

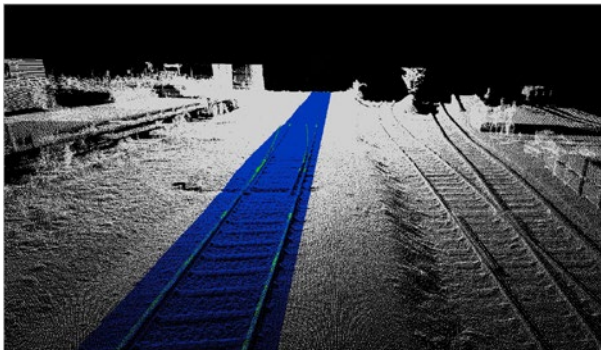


Abb. 8: Gescannte Weiche; Quelle: T. Stadler

~~Die Gleislageoptimierung aus 3D-Aufzeichnungen des inertialen Navigationsmesssystems~~

Mit dem inertialen Mess- und Navigationsmesssystem wurde ein innovatives nach EN13848-3 zugelassenes Gleisgeometrie-Abnahmemessgerät entwickelt und zugelassen [8, 15].

Das System besteht aus drei faseroptischen Gyroskopen (FOG) und drei Präzisionsneigungsmessern. Die Beschleunigungsaufnehmer im Zusammenwirken mit der inertialen Messeinheit (IMU) erlauben die Angabe absoluter Raumwinkel. Das gemessene Winkelbild wird gefiltert und daraus wird durch einfache Integration über die Bogenlänge die Raumkurve des Gleises errechnet. Die Projektion dieser Raumkurve auf die xy-Ebene ergibt den Grundriss („Landkartenansicht“) und die Projektion auf die yz-Ebene den Höhenverlauf in Gleislängsrichtung. Die bei der Bahn üblichen auf Sehnen bezogenen Pfeilhöhen und Längshöhen werden rechnerisch aus dem Grundrissbild und dem Höhenbild ermittelt. Für eine Bestimmung der realen unverzerrten Gleisfehler in einem bestimmten Wellenlängenbereich (D1-Band von 3-25 m oder D2-Band von 25-70 m) werden die Messdaten entsprechend gefiltert.

Ein großer Vorteil des inertialen Navigationsmesssystems ist die vereinfachte Kalibrierung des maschineneigenen Arbeitsmesssystems OMS. Diese benötigt keine Spezialisten, wie das üblicherweise bei konventionellen Maschinen der Fall ist, sondern wird vom Stopfmaschinisten selbst durchgeführt. Nach einer kurzen Messfahrt, beispielsweise 100 m, werden die Messergebnisse vom Inertialmesssystem und dem optischen Maschinenmesssystem verglichen. Aus dem Vergleich folgen die Offsets des OMS-Systems, die zur automatischen Kalibrierung benötigt werden.

Abb. 9 zeigt das Ergebnis einer Messfahrt mit anschließender automatischer Gleislage-Optimierung. In der ersten Spalte sieht man rot den errechneten Soll-Krümmungsverlauf und schwarz den Verlauf der Ist-Krümmung. In der zweiten Spalte sind

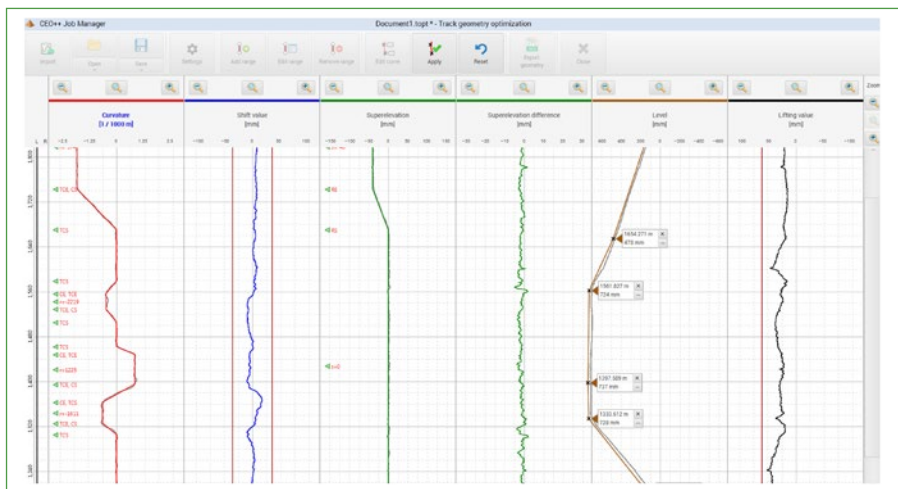


Abb. 9: Automatische Gleislageoptimierung mit Gleislagecomputer CEO++ nach Messfahrt mit dem inertialen Navigationsmesssystem

rot die zulässigen vorgegebenen Verschiebetoleranzen eingezeichnet und blau die zur Berichtigung notwendigen Verschiebungen. Die dritte Spalte zeigt grün die optimierte Soll-Überhöhung und schwarz den Verlauf der gemessenen Ist-Überhöhung. Die Differenz zwischen Soll- und Ist-Überhöhung wird in der Spalte vier als grüne Linie dargestellt. In der fünften Spalte sieht man den Verlauf der Ist-Höhe in schwarz und in braun den errechneten Verlauf der Soll-Höhe. Beispielhaft ist in dieser Spalte die manuelle Modifizierungsmethode gezeigt. Der Bediener kann den Polygonzug, der die Soll-Überhöhung definiert, verändern. Er kann die Eckpunkte verschieben, löschen oder neue setzen. Das Prinzip folgt dem Prinzip WYSIWYG (What You See Is What You Get) – auch als Echtzeitdarstellung bekannt. Die Folgen einer Korrektur durch den Bediener werden unmittelbar berechnet und gezeigt. Nicht zulässige Korrekturen werden berechnet und grau dargestellt. In der letzten Spalte sind die notwendigen Hebewerte in schwarz wiedergegeben. Rot eingezeichnet bei Verschiebe- und Hebewerten sind die vorgegebenen Grenzwerte. Das Optimierungsprogramm des Gleislagecomputers CEO++ arbeitet automatisch und erfordert keinen Bedieneringriff. Die Optimierung berücksichtigt Toleranzvorgaben und Vorschriften der Bahn (z.B. für die Länge von Übergangsbögen, Zuordnung Überhöhungen zu Radien und Fahrgeschwindigkeit etc.). Zwangslagen und Zwangspunkte können markiert und Hebung und Richtung bei diesen begrenzt werden. Im CEO++ ist neben dem Gleislagecomputer auch der digitale Abnahmeschreiber integriert.

5 Digitalisierung der Planiermaschine Ballast Robot 4.0

Der neu entwickelte Ballast Robot 4.0 (Abb. 10) nutzt bei Schotterprofiliermaschinen weltweit erstmals den vollen Umfang der vorhandenen Möglichkeiten der Digitalisierung.



Abb. 10: Ballast Robot 4.0

Der Ballast Robot 4.0 verfügt über einen universellen Flankenpflug, der in beide Richtungen pflügen kann und einen universellen geteilten Mittelpflug, der vollautomatisch im Gleisbogen nachgeführt wird. Die Digitalisierung erlaubt den Betrieb mit Ein-Mann-Bedienung. Erstmals wird auch bei Schotterplaniermaschinen ein Qualitätsabnahme-

schrieb realisiert. Über einen Schotterprofilscanner werden die im Soll-Bettungsprofil vorgegebenen Flankenwinkel, die Schotterbreite vor Schwellenvorkopf, Schotterüberschuss und Schottermangel aufgezeichnet und überprüft. Alle Aktoren sind mit Wegsensoren ausgestattet. Diese erlauben die vollautomatisierte Einstellung der Pflüge und deren Schilder entsprechend einem vorgegebenen Soll-Profil. Sonderprofile kann der Bediener selbst definieren und abspeichern. Bei Abruf werden diese vollautomatisch eingestellt. Hindernisse werden detektiert und die betroffenen Arbeitsaggregate von der Maschine automatisch angehoben bzw. wird Hindernissen ausgewichen.

5.1 Automatisierungsvoraussetzungen

Die Konzeption der Schotterplaniermaschine erfolgte unter den Gesichtspunkten einer maximalen Maschinen-Autonomie. 56 Hydraulikzylinder sind mit Sensoren ausgerüstet. Die elektronische Steuerung regelt die Hydraulikventile. Die einzelnen Zylinder werden durch die Steuerungstechnik der Maschine über 46 Steuerblöcke bedient und im Sinne einer optimalen Gesamtbewegung geregelt. Dadurch werden die Arbeitsabläufe im sequenzierten Verbund schneller und vor allem präziser durchgeführt. Das Automatisierungssystem ist dezentral auf der Maschine verteilt. Die externen Komponenten werden über ein redundantes Ethernet angebunden. Der Zustand der miteinander verbundenen Systeme wird permanent überwacht.

Der Computer für die Berechnung der optimalen Schotterverteilung sendet direkt Befehle an die Robotersteuerung des Flankenpfluges. Im Verbund Ballast Robot 4.0 mit dem Stopfroboter 4.0 werden infrastrukturenspezifische Daten zwischen den Maschinen übertragen. Für die Arbeit markante Stellen werden so über Lokalisierungsdaten (Gleiskilometer, GNSS-Koordinaten) maschinenübergreifend gekennzeichnet und verarbeitet.

Die Maschine verfügt über eine Wegmessung (Odometer), ein Satellitenmesssystem, ein WLAN und ein Mobilfunk-Modem. Über das Modem werden Schottermengen, Ist-Schotter-Profile, Zustandsdaten der Maschine und der Schotterabnahmereport automatisch an die Webplattform INFrame übertragen. Das WLAN muss bei Bedarf gesondert aktiviert werden. Es erlaubt dem Servicepersonal die einfache Inbetriebnahme der Maschine. Die Suche nach verfügbaren Netzwerkzugängen in vertretbarer Reichweite ist damit Vergangenheit. Trendbasiertes Zustandsmonitoring der Maschine sowie die 24-Stunden-Expertenpräsenz und Remote Analysis sind Bestandteile des Basisangebots [3].

Auf den Armlehnen der Bedienerstühle sind Touchscreens montiert. Der rechte ist für die Bedienung und Steuerung. Am linken Bildschirm werden Statusinformationen zu den Aggregaten und zum Schotterprofil dargestellt. Der Maschinist kann Videostreams selektieren und sich bei Bedarf am Monitor anzeigen lassen. Im Fußraum befindet sich ein Display, auf dem Videostreams zusätzliche Informationen bieten.

5.2 Profils Scanner und Abnahmeschrieb

An jedem Maschinenende befindet sich ein LiDAR-Scanner. Dieser erfasst und zeichnet das Schotterprofil auf. Die Schotterverhältnisse vor und nach der Bearbeitung werden erfasst. Abhängig von den Schottermengen werden automatisch die Positionen der Pflüge gesteuert und stellen eine optimale Verteilung sicher.

Das aktuelle Schotterprofil wird am Arbeitsende erfasst und mit dem vorgegebenen Soll-Profil verglichen. Der Abnahmeschrieb gibt die Messgrößen wieder und überprüft die Einhaltung der Toleranzen.

5.3 Nahbereichsüberwachung

Zur Nahbereichsüberwachung ist in jede Fahrtrichtung zusätzlich zu den Videokameras ein LiDAR-Scanner aufgebaut. Dieser verfügt über vordefinierbare Vorwarn- und Warnbereiche. Eine Vorwarnung löst ein akustisches Signal und eine Meldung aus. Wird der Gefährdungsbereich verletzt, stoppt die Maschine.

[Automatisierung der Arbeitsaggregate](#)

5.4 Der automatisierte Flankenpflug

5.4.1 Die Planiermaschine arbeitet in beide Richtungen.

Die Flankenpflüge sind daher um 180° drehbar ausgeführt. Damit fördert der Flankenpflug je nach Arbeitsrichtung den Schotter von vorne oder von hinten in den

Mittelpflug hinein. Zwischen dem hinteren Ende des Flankenpflugschildes und dem äußeren Leitblech des Mittelpfluges darf keine Lücke entstehen. Über Software ist eine virtuelle Kopplung herstellbar. Automatisch wird der Flankenpflug dann an den Mittelpflug virtuell angekoppelt und stellt einen kontinuierlichen Schotterfluss sicher. Das Resultat ist ein einfacher, intuitiver und ergonomischer Arbeitsvorgang.



Abb. 11: Kinematik des Flankenpfluges

Bei Änderung der Arbeitsrichtung, wird der Flankenpflug automatisch innerhalb des zugelassenen Arbeitsraumes umdisponiert. Vorgegebene Arbeitsstellungen werden entlang berechneter Bewegungsbahnen angefahren. Die Positionierung sowie der Ver- und Entriegelungsvorgang der Flankenpflüge wird auf diese Art erleichtert.

5.4.2 Kinematik des Flankenpflugs

Jeder der beiden Flankenpflüge verfügt über neun Gelenke, die in Summe elf Freiheitsgrade besitzen. Diese sind in Abb. 11 schematisch dargestellt. Die Regelung des Flankenschildes überdeckt den gesamten Funktionsbereich Flanke bis Sicherheitsraum. Dafür dienen Gleichungen für die Gelenkvariablen q und die Position und Orientierung des Flankenschildes z_E .

Es existiert keine analytische Lösung, daher muss diese mit einem numerischen Berechnungsverfahren gelöst werden. Als Ausgangspunkt dient der Zusammenhang der Gelenkgeschwindigkeiten $\dot{q} = J(q)^{-1} \dot{z}_E$ mit den Geschwindigkeiten des Schildes \dot{z}_E und der geometrischen Jacobimatrix $J(q)$. Durch Integration von \dot{q} erhält man die gesuchten Bewegungskordinaten der Gelenke $q(t) = \int_t^0 \dot{q}(\xi) d\xi + q(0)$.

Für eine fehlerfreie Berechnung der gesuchten Gelenkkoordinaten wird die Ausgangsgleichung mit einen Fehlerterm Ke erweitert. Der Fehlervektor e setzt sich aus dem Positions- und dem Orientierungsfehler zusammen. Mit dem Ansatz $\dot{q} = J(q)^{-1} (\dot{z}_E + Ke)$ erhält man ein äquivalentes lineares Fehlersystem, das für eine positiv definite Matrix K , asymptotisch stabil ist.

Für die Regelung des Flankenpfluges werden sechs der elf Freiheitsgrade verwendet. Das Flankenschild kann frei im Raum bewegt werden. Jede gewünschte Bewegungsbahn kann vorgegeben werden. Für die Berechnung und Steuerung werden gängige Methoden der Robotik eingesetzt.

5.4.3 Bedienung des Pfluges

Der Bediener kann die Position und Orientierung des Schildes beliebig vorgeben. Er stellt Position, Flankenwinkel, den Winkel zur Schienenlängsrichtung sowie den Angriffswinkel zwischen Schild und Flanke unabhängig voneinander ein.

Steht die Drehachse normal auf die Flankenebene, wird das Schild mit nur einem Steuerungselement entlang der Flanke (mit beliebigen Flankenwinkel) bewegt. Das Ausweichen von Hindernissen wird dadurch enorm erleichtert. Um z.B. einem Oberleitungsmast auszuweichen (Abb. 12), muss das Flankenschild nicht nur zur Maschine gezogen, sondern auch entsprechend dem Flankenwinkel angehoben werden. Die Steuerung der Planiermaschine führt die Kombination der beiden Bewegungen automatisch aus. Der Bediener beobachtet und kontrolliert lediglich die Schildspitze. Das

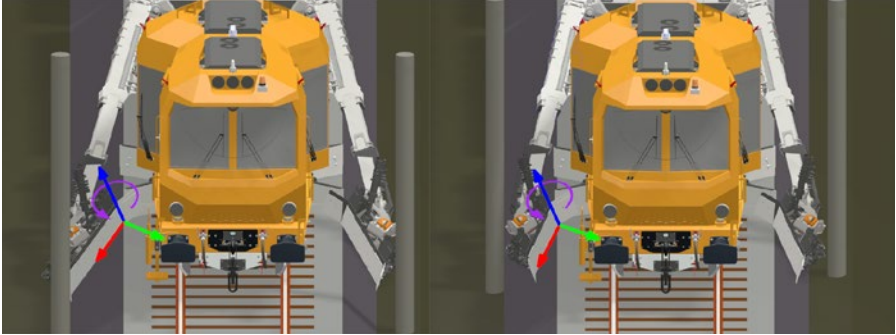


Abb. 12: Erleichterte Führung des Flankenpfluges – Ausweichen vor einem seitlich stehenden Mast

entlastet ihn und reduziert und vereinfacht notwendige Bedienerhandlungen – die Qualität der Schnittführung steigt erheblich.

Der Flankenwinkel der Bettung ist absolut bezüglich der Schwerachse. In der Überhöhung muss deswegen der Pflugwinkel angepasst werden. Diese Korrektur wird ebenfalls von der Pflugsteuerung automatisch berücksichtigt. Grundlage ist die elektronische Messung der Überhöhung mittels Inklinometer.

Abb. 13 zeigt ein Schirmbild des Ballast Robot 4.0 mit Informationen über die Arbeitsaggregate und die gemessenen Schottermengen, die die Grundlage für ein Expertensystem sind, um automatisch die Stellung der Pflüge zu ermitteln. Die hori-



Abb. 13: User Interface Ballast Robot 4.0

zontalen Balken geben die seitliche Auslenkung des Mittelpfluges an, die vertikalen die Höhenstellung. In den Viertelkreisen wird die Abweichung der Winkelstellung der Flankenpflüge von der Sollvorgabe angegeben.

6 Das Infrastrukturexpertensystem

Die geleistete Verdichtarbeit und die sich einstellende Verdichtkraft beim Stopfen drückt die Schotterbetthärte und den Verschmutzungsgrad aus. Der Verlauf der Verdichtkräfte und der Schotterbetthärte in Längsrichtung des Gleises von Schwelle zu Schwelle erlaubt die Auswertung der Qualität und Stetigkeit der Bettung. Findet sich lokal bei einigen Schwellen ein Einbruch der Verdichtkraft, liegt ein Schotterdefekt vor. An solchen Stellen treten hohe Rad-Schiene-Kräfte auf, die den Schotter unter den Schwellen zerstören und zerkleinern. Abgenutzte runde Schotterkörner eignen sich nicht mehr ausreichend zum Verdichten. Aus dem Mittelwert der Schotterbetthärte und deren Standardabweichungen ist der Rückschluss auf die Gleislageverschlechterungsrate und auf den Verschmutzungsgrad möglich. Lokale Unstetigkeiten kurzer Länge werden als Einzelfehler identifiziert. Neben Verdichtkraft, Beistellweg und Verdichtarbeit wird die Schotterbettsteifigkeit ermittelt und aufgezeichnet und vom Stopfroboter 4.0 über Mobilfunk automatisch an die Webplattform INFrame übertragen (Abb. 14). Eine weitere wichtige Größe ist die Schotterdämpfung, die sich aus dem Quotienten Kraftanstieg zu Beistellgeschwindigkeit ergibt.

Abgespeichert werden in INFrame die Einsatzdaten, lokalisiert mit GNSS. Der Nutzer sieht die GNSS-Spur (in Grün) des Arbeitsbereiches in der Landkarte. Rechts oben ist



Abb. 14: Schirmbild der Infrastrukturplattform INFrame

ein Foto des Stopfumfeldes zu sehen. Bei jedem Stopfvorgang wird ein Foto aufgenommen. Das Bild wird durch Anklicken vergrößert. Es liefert visuelle Informationen über die Schotterverhältnisse, die Art der Schwellen etc.

Unter der Landkarte werden interaktiv verschiedene Diagramme aufgezeichneter Parameter, die bei jedem Stopfvorgang gemessen

wurden, dargestellt. Beispielsweise ist im oberen Diagramm die Verdichtkraft in grün, die Schotterbetthärte in blau und der Beistellweg in braun ausgeführt. Dazu sind verschiedene Marker eingetragen. Im Diagramm unterhalb wird die Verdichtkraft gezeigt, wobei teilweise Doppelstopfen der Schwellen angewendet wurde. Blau entspricht dem ersten Stopfvorgang und zyklam dem zweiten. Jeder Stopfroboter von System7 ist mit einem Schotterbettreport ausgestattet, der auf der Maschine erzeugt und an die Webplattform INFrame übermittelt wird.

Um aus den ermittelten Daten nützliche und wertvolle Informationen abzuleiten, ist die automatisierte Verarbeitung und Interpretation derselben unumgänglich [10]. Ein stetig wachsender Anteil der zur Analyse eingesetzten Algorithmen ist dem Bereich der KI zuzuordnen. KI-Systeme finden Zusammenhänge und Muster in unterschiedlich strukturierten Datenmengen, die der menschliche Interpret kaum oder nicht erfassen kann. KI-Systeme erstellen Prognosen hinsichtlich des Eintretens von Gleislageverschlechterungen und Gleisfehlern und entwickeln Wartungsvorschläge zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Gleislage. ML-Techniken sorgen für eine stete Verbesserung der Prognosen. Zur Echtzeit-Analyse der Gleisparameter bezieht das Expertensystem des Stopfroboters 4.0 die Parameter Verdichtkraft und -arbeit, Beistellweg und -zeit, Schot-

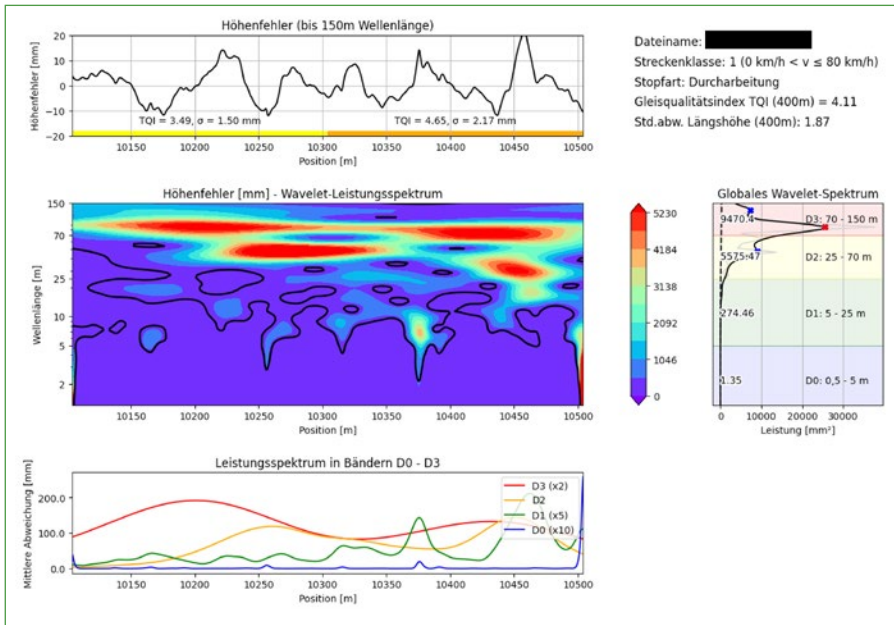


Abb. 15: Auszug aus der Analyse des Schotterbettreports Streckenklasse 1 ($0\text{km/h} < v \leq 80\text{km/h}$)

terbetthärte, -steifigkeit und -dämpfung, Eindringzeit, sowie die Gleislage vor und nach der Stopfarbeit mit ein. Das Expertensystem verwendet statistische Kenngrößen für die jeweiligen Zielparame-ter der Kategorien Gleislage und Schotterbettung.

Das Expertensystem von System7 identifiziert Störstellen und empfiehlt Instandhaltungsmaßnahmen. Durch kontinuierliche Sammlung der Gleis- und Schotterqualitätsdaten und die stetige Verbesserung der Wissensbasis wird eine verlässliche Prognose der zukünftigen Gleislage-Entwicklung nach einer Stopfung ermöglicht.

Abb. 15 zeigt beispielsweise das Ergebnis der Analyse eines 400 m langen Abschnittes eines Gleises der Streckenklasse 1 ($0 \text{ km/h} < v \leq 80 \text{ km/h}$). In der gezeigten Heatmap finden sich abhängig von den Fehlerwellenlängen die Orte, an denen die Fehlerintensität besonders hoch ist. Die Analyse liefert nicht nur lokale Angaben, sondern weist auf die Fehlerursachen selbst hin. Im Bereich der Wellenlängen unter 5m sind es Schwellenhohllagen, die zur Schotterbeanspruchung beitragen, der Bereich bis 25 m zeichnet den Schotterzustand aus, von 25-70 m sind es Probleme der Zwischenschicht (beispielsweise Drainageprobleme). Wellenlängen über 70 m kennzeichnen Untergrund- und Tragfähigkeitsprobleme. Einzelfehler werden gesondert ausgewertet und angegeben. Die automatische Analyse des Expertensystems weist auf Fehlerursachen und de-

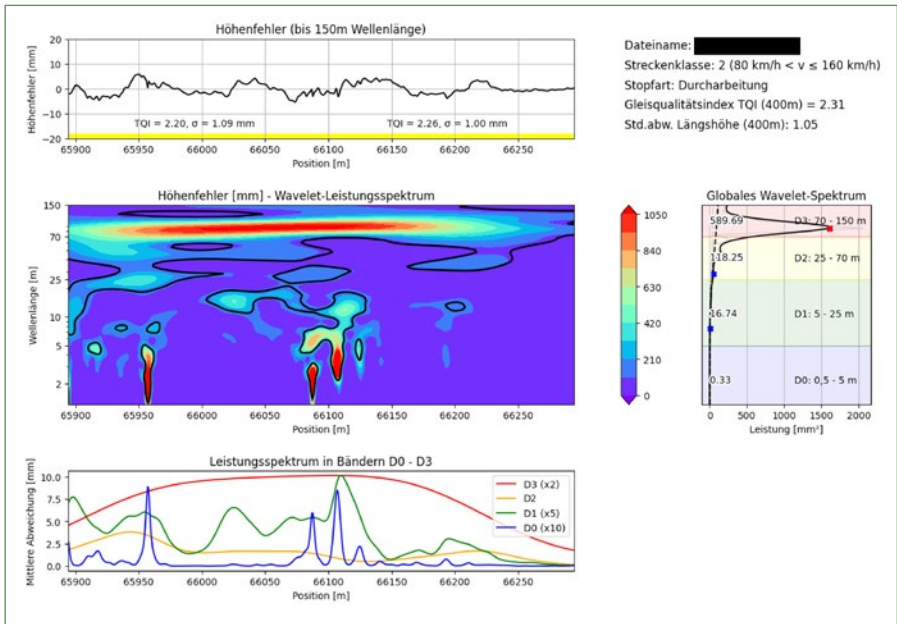


Abb. 16: Auszug aus der Analyse des Schotterbettreports Streckenklasse 2 ($80 \text{ km/h} < v \leq 160 \text{ km/h}$)

ren Lokalisation hin, gibt eine Einschätzung der Qualität und der künftigen Entwicklung des Gleises. Zusätzlich werden Maßnahmen zur Behebung der Fehler vorgeschlagen. Die konkrete Auswertung zeigt erhebliche Tragfähigkeitsschwächen des Gleises und der Zwischenschicht. Rechts neben der Heatmap ist das Globale Wavelet Spektrum zu sehen. Dieses ist in die vier Wellenlängenbänder D0, D1, D2 und D3 eingeteilt. Peaks in den Spektren geben Bereiche besonders stark ausgeprägter Fehlerwellenlängen an. Oberhalb der Heatmap ist der langwellige Höhenfehler über eine Gleissektion von 400 m zu sehen. Die farbigen Balken stehen für den zugeordneten Track Quality Index und geben die Standardabweichung der 200 m Abschnitte des Längshöhenfehlers an.

Im Diagramm unter der Heatmap wird die über den jeweiligen Wellenlängenbereich gemittelte Intensität dargestellt. Die Maxima zeigen besonders ausgeprägte Störstellenbereiche.

Abb. 16 zeigt im Vergleich die Analyse einer Gleissektion von 400 m der Streckenklasse 2 ($80 \text{ km/h} < v \leq 160 \text{ km/h}$). Die auftretenden Gleisdefekte (Intensitäten) sind weniger stark ausgeprägt als bei der vorhergehenden Auswertung des Abschnitts der Streckenklasse 2.

Zur objektiven Beurteilung der Qualität eines Streckenabschnittes werden die mit den Stopfmaschinen erfassten Daten statistisch ausgewertet. Die Datenbank wird mit den Ergebnissen der Einsätze der aktiven Maschinen laufend ergänzt. Die Häufigkeitsverteilungen werden automatisch erweitert und die dem Expertensystem zugrunde liegenden statistischen Verteilungen auf den neuesten Stand gebracht. Abb. 17 zeigt das

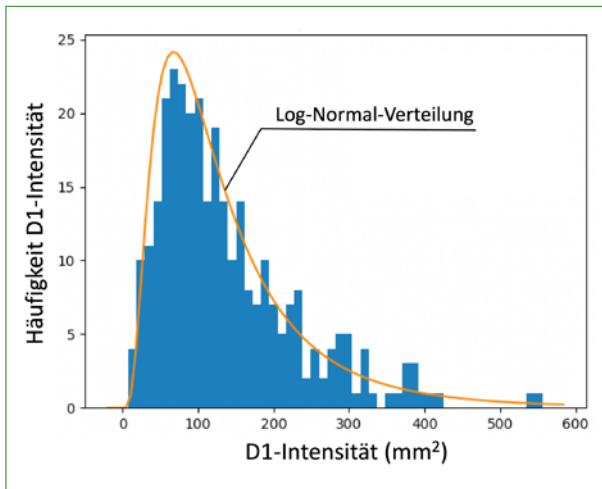


Bild 17: Log-Normal-Verteilung gemessener 400m-Abschnitte der Streckenklasse 1 der Fehlerintensität des Wellenlängenbereiches D1 (Schotterband)

Histogramm der Intensitäten des D1-Bandes. Bestfittend sind Log-Normal-Verteilungen. Um einen aktuell gemessenen Abschnitt objektiv hinsichtlich seiner Qualität beurteilen zu können, wird die Verteilung in 10 Abschnitte unterteilt, die jeweils gleiche Flächen-summe aufweisen. Damit kann ein aktuell gemessener Abschnitt den Klassen der Verteilung zugeordnet werden. Je höher die Einstufung umso schlechter die Qualität.

Mit Hilfe dieser Verteilungen und den entsprechenden Zuordnungen wird ein KI-System trainiert, welches automatisch den Gesamtzustand des Gleises, die wahrscheinliche Gleislageverschlechterungsrate, lokale Fehlerstellen und die Ursachen der Gleislagefehler über die Intensität der Wellenlängenbereiche angibt.

Abb. 18 zeigt die Netzdiagramme, die für jeweils 400 m gestopfte Abschnitte automatisch ermittelt, im Schotterbettreport ausgegeben und auf der Infrastrukturdatenbank INFrame gespeichert werden. Links im Bild wird übersichtlich auf die Ursachen der Gleisfehler eingegangen und rechts speziell auf den Schotterzustand und die Gleisgeometrie. Je kleiner die Werte sind umso günstiger sind die Verhältnisse. Der Flächeninhalt der Netzdiagramme steht für die Gesamtqualität des betrachteten 400 m-Abschnittes und wird gesondert errechnet.

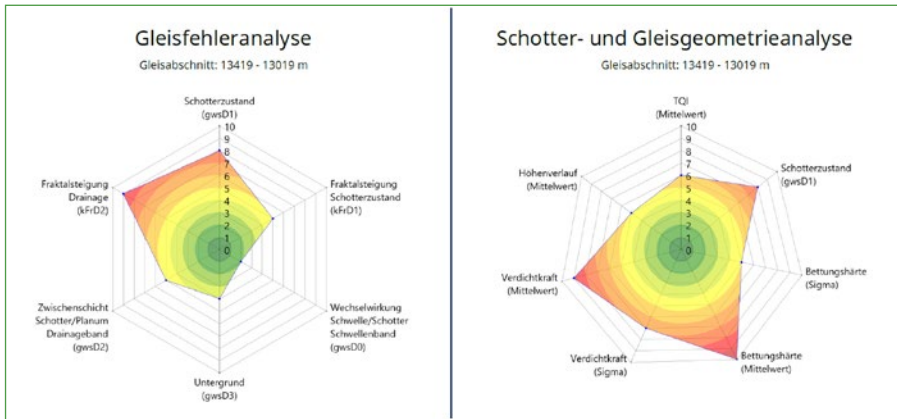


Abb. 18: Ergebnis Expertensystem in Form von Netzdiagrammen

Neben der Waveletanalyse wird ergänzend eine Fraktalanalyse durchgeführt. Bei dieser Art der Analyse werden Messkurven durch immer dichtere Polygone genähert und deren Länge berechnet. In doppelt logarithmischer Darstellung der Polygonlänge über der Wellenlänge (sich aus der Teilung und der ursprünglichen Abschnittslänge er rechnend) ergeben sich Kurven mit abschnittswisen Regressionsgeraden. Diese lassen sich den Fehlerursachen zuordnen. Insbesondere der Schotterzustand im Hinblick auf notwendige Reinigungsarbeiten ist eines der Ergebnisse der Fraktalanalyse [12, 13].

7 Das prognoseorientierte Zustandsmonitoring RaVeM

Das Spektrum der Sensortechnologie erweitert sich rapide. Sensoren werden billiger und komplexer. Das führt zu einer raschen Ausweitung der Zustandsüberwachung von Systemen, Strukturen, Fahrzeugen und Maschinen. Drahtlose Sensornetzwerke

dienen der Überwachung von Eisenbahninfrastrukturen wie Brücken, Weichen, Gleisen, Gleisbett und Gleisanlagen sowie der Zustandsüberwachung von Fahrzeugen mit Fahrgestellen, Drehgestellen, Rädern, Achslagern und Getrieben. Die Zustandsüberwachung reduziert den Bedarf an menschlichen Inspektionen durch automatisierte Überwachung, verringert den Wartungsaufwand durch die Erkennung von Fehlern, ehe sie eskalieren und verbessert die Sicherheit und Zuverlässigkeit. Dies ist für den Ausbau, die Modernisierung und die Erweiterung von Eisenbahnnetzen von Bedeutung.

RaVeM (Railway Vehicle Monitoring) ist ein prognoseorientiertes Condition Monitoring System, welches den Zustand der Maschinenkomponenten messtechnisch verfolgt und daraus eine Ausfallprognose erstellt [14]. Diese Prognose erlaubt die rechtzeitige Information der Instandhaltungsstelle und gibt Zeit zur Planung der Durchführung entsprechender Maßnahmen. Die Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen ist besonders wichtig, da viele der Fahrzeuge international unterwegs sind und die Rückführung ins Instandhaltungswerk terminlich geplant werden muss. RaVeM ist webbasiert und plattformunabhängig.

8 Fernwartung über das 24-Stunden-Expertenpräsenzsystem

Über die 24-Stunden-Hotline erreicht eine Anfrage einen Experten. Ziel ist es den Maschinenführer bei einer Problemstellung sofort und unmittelbar zu helfen.

Das Computersystem erlaubt den Fernzugriff durch autorisiertes System7-Personal [6]. Nach dem Einloggen haben die Spezialisten Zugriff auf alle Funktionen. Abb. 19 zeigt die Arbeitsumgebung im Falle eines Fernzugriffs, aktuell eingeloggt auf einer gerade im Tageseinsatz befindlichen niederländischen Maschine. Ganz links im Bild auf

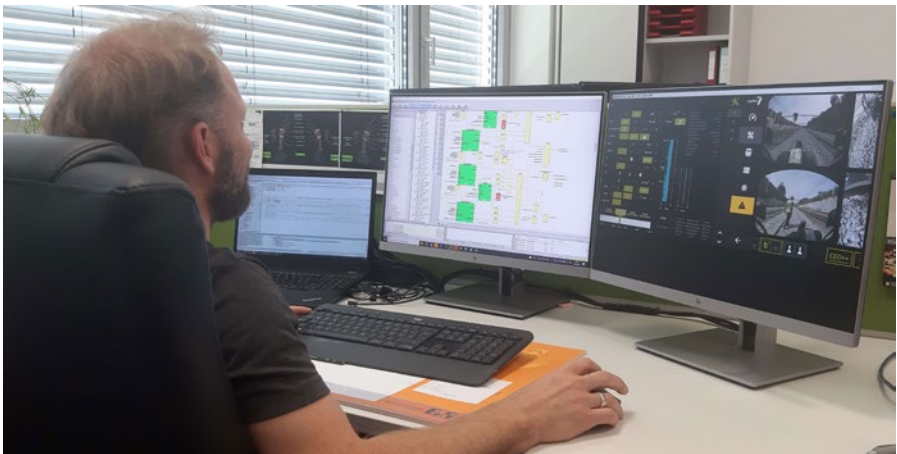


Bild 19: Arbeitsumgebung im Falle eines Fernzugriffs

dem Laptop der Programmcode, in der Mitte die Modularstellung der Steuerung und rechts die aktuellen Screens, die der Stopfmaschinist sieht – in real time. Am rechten Schirm werden der zentrale Stopfschirm (links) und die vom Maschinisten ausgewählten Videobilder (rechts) gezeigt, die ebenfalls live übertragen werden.

Das Expertenpräsenzsystem ist für die Maschinenführer zu jeder Tages- und Nachtzeit erreichbar. Aktuell wird eine Datenbrille erprobt – der Maschinist vor Ort wird zum verlängerten Arm des Servicetechnikers.

9 Datensicherheit

Das Bahnsystem arbeitete bislang mit privaten und abgeschlossenen Computernetzen. Im Zuge des sich verbreitenden IoT wird auch die Bahn Teil des Internets. Das Ausmaß und die Häufigkeit von Cyberangriffen auf vernetzte Computersysteme nehmen ständig zu und sind zu einer erheblichen Bedrohung der Sicherheit der Bahn geworden [20]. Cyberangriffe können schwerwiegende und sicherheitskritische Auswirkungen zur Folge haben. In der „Studie Cybersecurity und Technologieeinsatz“ des Deutschen Zentrums für [Schienenverkehrsforschung](#) beim Eisenbahn-Bundesamt (DZSF) wurden zahlreiche Stakeholder nach ihrer Einschätzung der Sicherheit gegen Cyber-Angriffe befragt [11]. Es wurden die Kriterien des Cybersecurity-Frameworks des amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) angewendet. Die Kriterien des NIST sind Identifizieren (Identify), Schützen (Protect), Erkennen (Detect), Reagieren (Respond) und Wiederherstellen (Recover).

Abb. 20 zeigt die Einschätzung der befragten Unternehmen im Hinblick auf die Erfüllung der Cybersecurity-Kriterien. Die Skala wurde auf 3,0 begrenzt, da keines der Unternehmen einen höheren Wert erzielte. Das sich ergebende Bild zeigt akuten Handlungsbedarf für die Branche.

Mit dem entstehenden hohen Vernetzungsgrad der IoT-Geräte ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Informationssicherheit bzw. Cybersicherheit¹ der beteiligten Systeme und Abläufe. Generell wird darunter die Praxis zusammengefasst, kritische Systeme und sensible Informationen vor digitalen Angriffen zu schützen. Digitale Angriffe stellen primäre Bedrohungen für vernetzte Systeme dar und können ihren Ursprung sowohl außerhalb als auch innerhalb eines Unternehmens haben, das vernetzte Systeme einsetzt. Maßnahmen zur Erhöhung der Cybersicherheit stellen die Schutzziele Vertraulichkeit, Integrität, und Verfügbarkeit (in Anlehnung an die englischen Ausdrücke kurz CIA-Triade genannt) in den Vordergrund.

¹ Die Begriffe Cybersecurity, Cybersicherheit und Informationssicherheit werden in Folge gleichbedeutend verwendet.

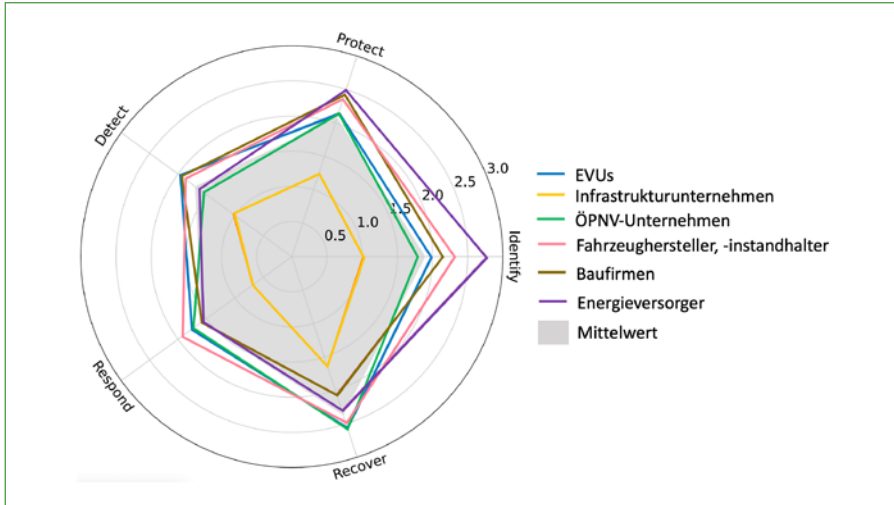


Bild 20: Eigene Einschätzung der befragten Unternehmen im Hinblick auf die NIST-Kriterien [11].

Vertraulichkeit impliziert, dass Informationen nur den Empfängern zugänglich sind, die berechtigt sind, diese Informationen einzusehen bzw. zu verwenden. Nicht autorisierte Veröffentlichungen sowie die Weitergabe an Unbefugte gilt es zu verhindern. Im Zusammenhang mit digitalisierten Oberbaumaschinen ist ein typisches Bedrohungsszenario das Abfangen von Einsatz-, Gleisgeometrie- und/oder Abnahmedaten durch einen Angreifer, der diese sensiblen Daten veröffentlicht.

Die Aufrechterhaltung der Integrität von Informationen bedeutet, unbefugte Modifikation zu erkennen und nach Möglichkeit zu unterbinden. Die Möglichkeiten, die System- und Informationsintegrität anzugreifen sind breit gefächert. Erlangt ein Angreifer physischen und/oder digitalen Zugang zu einem Computersystem innerhalb des Computernetzwerks einer Oberbaumaschine, ist damit die Grundlage für weitere Manipulation geschaffen, vom Abgreifen und Verändern von Daten bis hin zum Verhindern der korrekten Funktionalität der Maschine.

Das Schutzziel Verfügbarkeit wird durch die Sicherstellung realisiert, Befugten rechtzeitig und zuverlässig den Zugang zu Informationen und digitale Ressourcen einzuräumen. Angreifer sollen nicht in der Lage sein, diesen Zugang zu behindern oder zu verweigern. Ein denkbares Angriffsmuster könnte beispielsweise den Leitcomputer einer Stopfmaschine zum Ziel haben, auf dem sämtliche für einen bevorstehenden Gleisinstandhaltungseinsatz nötigen Daten (Geometriedaten, Korrekturdaten, etc.) gelöscht würden.

In Konkurrenz zu diesen Zielen steht eine Reihe von praktischen Aspekten, die den industriellen Betrieb von digitalisierten Oberbaumaschinen erleichtern bzw. verbessern, jedoch nicht die Schutzziele der Cybersicherheit beeinträchtigen dürfen. Interoperabilität gilt als Mehrwert der Digitalisierung von Systemen und trägt bei adäquater Umsetzung zur Steigerung der Effizienz des gesamten Arbeitsprozesses bei. Ein nahtloser Datenaustausch zwischen Vormesssystemen, Gleisstopf- und Schotterplaniermaschinen, und dem Infrastrukturbetreiber von Gleisanlagen kann personellen wie organisatorischen Aufwand deutlich reduzieren. Dieser Austausch ist beim Einsatz von System7 Oberbaumaschinen bereits etabliert und erfordert erhöhte digitale Sicherheitsvorkehrungen (Verwendung sicherer Übertragungsprotokolle, Ende-zu-Ende Verschlüsselung, digitale Zertifikate).

Die Skalierbarkeit der eingesetzten Systeme im Hinblick auf die Erweiterbarkeit der bestehenden digitalen Ressourcen stellt sicher, dass Oberbaumaschinen für die Anforderungen der Gegenwart wie auch für jene der Zukunft gerüstet sind. Dieser Aspekt ist besonders für Maschinen mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten relevant, insbesondere um neue, zum Zeitpunkt der Auslieferung noch nicht bekannte Möglichkeiten der Digitalisierung umsetzen zu können. System7 nutzt Methoden des ML für die Gleis- und Schotterbearbeitung (siehe Kap. 2). Die eingesetzten Algorithmen sind sehr rechenintensiv, sollen erweitert werden können und steigern folglich den Bedarf an digitalen Ressourcen auf den Maschinen. Durch durchdachte Sicherheitskonzepte (Netzwerk-segmentierung, Whitelisting/Blacklisting, Firewalls) wird verhindert, dass zusätzliche Angriffsfläche entsteht.

Die physische und digitale Zugänglichkeit zu neuralgischen Systemkomponenten ist ein kritischer Faktor für die schnelle Behebung von Problemen im Feldeinsatz und für die Wartbarkeit der Maschinen. Es muss jederzeit möglich sein, ein defektes System im Feld mit geringem Aufwand auszutauschen. Gleichzeitig muss die missbräuchliche Verwendung der dafür nötigen digitalen Schnittstellen durch einen potenziellen Angreifer verhindert werden. System7 realisiert dies unter anderem mittels Zero Trust Strategie, Geräteauthentifizierung und Multi-Faktor-Authentisierung, und dem Betrieb von Extended Detection and Response (XDR) Systemen.

Zusätzlich erschwerend wirkt eine im industriellen Umfeld oft anzutreffende Praxis, die unter der Formulierung „Sicherheit durch Unklarheit (Security by Obscurity)“ zusammengefasst wird. Es wird vermeintliche Sicherheit dadurch geschaffen, dass implementierte Sicherheitsmaßnahmen und -funktionen geheim gehalten werden. Dabei geht man irrtümlich davon aus, dass diese auch geheim bleiben werden, was sich in der Realität oft als Irrtum herausstellt und Gefahrenpotenzial birgt. In der Entwicklung und im Einsatz von Software, sowie in der Implementierung von Computernetzwerken und IoT-Komponenten verfolgt System7 eine konzeptionsintegrierte Sicherheitsstra-

ategie („Security by Design and by Default“), wie diese in der 2019 in Kraft getretenen EU-Verordnung 2019/881 [25] gefordert wird. Die Strategie verlangt, dass während des kompletten Lebenszyklus der entwickelten Systeme grundsätzlich von Cyberangriffen auszugehen ist und umfassende Gegenmaßnahmen ergriffen und ständig weiterentwickelt werden. Produktkonfigurationen, wie z. B. eingesetzte Protokolle, Authentifizierungsrichtlinien, etc., werden grundsätzlich dem höchsten Sicherheitsmaß entsprechend gesetzt. Eine etablierte Reihe von Normen und Richtlinien unterstützt bei der Umsetzung eines solchen informationssicheren Betriebs von vernetzten digitalisierten Oberbaumaschinen und der daran beteiligten IT-Infrastruktur (IEC 62443 [26], ISO27k [27], IT-Grundschutz [28]). Die referenzierten Normenreihen bilden die Grundlage für die digitalen Produkte und Services von System7.

Eines der größten Risiken für die Gefährdung der Cybersicherheit liegt in den digitalen Wartungszugängen [17,18, 19]. Das in Kap. 8 erwähnte 24-Stunden-Expertenpräsenzsystem baut auf einem abgesicherten digitalen Fernwartungszugang auf, der mittels verschlüsselter VPN-Verbindung realisiert wird. Die Experten müssen sich im Fernwartungsfall mittels 2-Faktor-Authentifizierung bei einem Server im System7 Data Center anmelden. Die Anmeldungen werden zentral protokolliert, sodass die Dauer der Tätigkeit im Nachhinein genau ersichtlich ist und ausgewertet werden kann. Auf der Oberbaumaschine ist ein physischer Schalter aufgebaut, der den Fernwartungs-Zugriff aktiviert (Opt-In-Prinzip). Das Umlegen des Schalters terminiert den Wartungszugang unverzüglich. Ist die Fernwartung aktiv, wird dies den Bedienenden angezeigt. Neben den erwähnten allgemeinen Schutzziele wird bei diesem Dienst zusätzlich die Authentizität der beteiligten Systeme (die der Oberbaumaschine und die des System7 Data Centers) und Personen sichergestellt. Das Bedienpersonal der Oberbaumaschine kann im Support-Fall jederzeit prüfen, ob die Unterstützung durch einen autorisierten System7 Experten passiert. Umgekehrt ist auch den Experten ersichtlich, mit welcher Oberbaumaschine sie verbunden sind.

Die Sicherstellung der Authentizität der beteiligten Parteien ist nicht nur im Wartungsfall von erheblicher Bedeutung. Im gesamten Prozess der Gleisstandhaltung können verschiedene Datenströme zwischen Auftraggeber (Bahnbetreiber, Behörden) und Auftragnehmern (Gleisbauunternehmen, Geometer, Oberbaumaschinenverantwortliche) stattfinden. Die Digitalisierung dieser Datenströme bringt erhöhten digitalen Schutzbedarf mit sich. Der Einsatz einer vollumfänglichen Verschlüsselung nach dem neuesten Stand der Technik bildet dabei die Grundlage für einen effizienten und manipulationssicheren digitalen Datenaustausch im Bahnbetrieb. Auftragsdokumente, Geometrie- und Korrekturdateien, Abnahmeschriebe und dergleichen haben direkten Einfluss auf die Gleisinfrastruktur und sind als besonders kritisch einzustufen. Der Datenaustausch dieser Dokumente zwischen den beteiligten Parteien wird auf Basis

einer Public Key Infrastruktur [29] abgebildet, die auch System7 Oberbaumaschinen als authentifizierte Datenquellen und -adressaten mit einbezieht. Die Empfängerpartei erhält die nötigen Dokumente versehen mit einer digitalen Signatur. Digitale Signaturen stellen die Herkunft der Dokumente, und damit deren Authentizität sicher. Eine nachträgliche Veränderung der Dokumente würde zum Fehlschlagen einer beim Empfänger durchgeführten Signaturprüfung führen. Somit wird zusätzlich die Manipulationssicherheit gewährleistet.

10 Entwicklungsziel digitalisierter Oberbaumaschinen

Ziel der Digitalisierung von Oberbaumaschinen ist die vollautomatische Arbeitsweise. Diese erlaubt das Arbeiten der Maschinen unter Aufsicht eines Menschen. Sobald das autonome Fahren von Zügen etabliert ist, wird diese Funktion auch in Oberbaumaschinen integriert werden. Dann ist der Zeitpunkt der Realisierung der autonomen Arbeit von Oberbaumaschinen gekommen.

Autonome Systeme arbeiten vollautomatisch. Die Maschinen bewegen und arbeiten aufgrund vorgegebener Steuerungen und Regelungen oder von außen vorgegebenen Anweisungen vollautomatisch. Autonom bedeutet selbstverantwortlich, selbständig und unabhängig zu funktionieren. Das erfordert intelligentes Verhalten, damit die Maschine auf neue unbekannte Probleme sinnvoll reagiert. Technisch bedeutet es den Einsatz von KI-Methoden oder die Anwendung Maschinellem Lernverfahren. Eine Gleisstopfmaschine, die lernen und ihre Entscheidungen verbessern soll, muss trainiert werden. Menschliche Erfahrung und Wissen gibt der Maschine Wertungen vor, aus denen sie lernt. Erfolgreiches Training wird durch die Korrektur der Entscheidungen der Maschine ersichtlich. Zweifellos beschleunigen Deep-Learning Netzwerke den Erfolg auf dem Weg zur Vollautomatisierung und dem autonomen Arbeiten [16].

10.1 Voraussetzungen einer autonomen Maschine

Zu den Voraussetzungen für eine autonome vollautomatische Arbeitsweise zählen [5, 6]:

- hohe Ausfallsicherheit der sicherheitskritischen und neuralgischen Komponenten,
- hohe Betriebssicherheit (Safety),
- Informationssicherheit (Security),
- Vernetzbarkeit,
- Fehlertoleranz und Selbstüberwachung,
- Widerstandsfähigkeit gegenüber Umgebungsbedingungen,
- situationsbedingte Adaptions- und Lernfähigkeit (Deep Learning Methoden),
- eigenständiges Entscheiden auf unbekannte Situationen,
- präzise Ortung,

- Vorhandensein einer sicheren Rückfallebene bei Unvorhergesehenem oder im Gefahrfall und die
- akustische oder optische Signalisierung der Gefährdung der Umgebung durch die autonome Maschine.

Zahlreiche der genannten Anforderungen sind auf dem Stopfroboter 4.0 und dem Ballast Robot 4.0 bereits umgesetzt. Einige Funktionen, wie die simulationsbedingte Adaptions- und Lernfähigkeit und das eigenständige Entscheiden auf unbekannte Situationen, sind in Vorbereitung bzw. in der Testphase.

Quellen

- [1] Tao, F.; Qi, Q.; Wang, L.; Nee, A. Y. C.: Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison; Engineering 5, 2019, pp. 653-661
- [2] Barricelli, B. R.; Casiraghi, E.; Fogli, D.: A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications; IEEE Access, Volume 7, 2019, pp. 167653-167671
- [3] May, I.: Das Potenzial der Spieletechnologie für Building Information Modelling; El-Eisenbahningenieur, August 2018, S. 37-39
- [4] Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C.; Barlow, C.: Digital Twin: enabling Technologies, Challenges and Open Research, IEEE Access, Volume 8, 2020, pp. 108952-108971
- [5] Lichtberger, B.: Das neue System7 – Automatikstopfen erhöht die Haltbarkeit der Gleislage: Einsatzergebnisse; ETR-Eisenbahntechnische Rundschau, September 2020, S58-63
- [6] Stute, E.; Vogel, R.; Söllinger, M.; Lichtberger, B.: Umweltfreundlich und ressourcenschonend stopfen; El-Eisenbahningenieur, Mai 2019, S. 48-54
- [7] Socotec: Test Report: Site: Guide Bridge 73942 Sys 7; Job Nr. 29402; Report Nr. OHEM/ 14175, 30.8.2018; Socotec: Test Report: Site: Guide Bridge 73910; Job Nr. 29402; Report Nr. OHEM/ 14174, 30.8.2018
- [8] Lichtberger, B.; Mittermayr, P.; Kuttelwascher, C.: Präzise Gleisvermessung mit einem inertialen Mess- und Navigationsmesssystem; El-Eisenbahningenieur, November 2020, S. 46-50
- [9] Smith, G.: System 7 – Report One Follow Up Questions, Network Rail, 2022
- [10] Lichtberger, B.; Schmitzberger, H.: Abnahmeschrieb des Schotterbettzustandes durch eine Hochleistungsstopfmaschine – in situ Messung während des regulären Stopfbetriebes, ZEVrail 144, Oktober 202, S. 372-378
- [11] Iffländer, L.; Mühl, K.; Nord, M.: Sind Eisenbahn- und ÖPNV-Sektor fit für die heutigen Cybersecurity-Herausforderungen? ETR-Eisenbahntechnische Rundschau, November 2022, S. 10-15
- [12] Hyslip, J.s P.; Trosino, M. J.; Selig, E. T.: Fractal Analysis of Geometry Data; Journal of the Transportation Research Record, 2002
- [13] Hansmann, F.; Landgraf, M.: Wie fraktal ist die Eisenbahn? ZEVrail, Jahrgang 137, November/ Dezember 2013
- [14] Lichtberger, B.: Bahnindustrie 4.0: Innovative Railway Vehicle Monitoring RaVeM in der Anwendung; ZEV-rail 140, Mai 2016
- [15] ÖNORM EN 13848-3 Bahnanwendungen - Oberbau - Gleislagequalität - Teil 3: Messsysteme - Gleisbau- und Instandhaltungsmaschinen
- [16] Lichtberger, B.: Auf dem Weg zum autonomen Arbeiten – der Universal Tamper 4.0; EIK-Eisenbahningenieur-Kompodium, 2022, S. 15-40
- [17] Stavrianiadis, K.: Schutz vor Cyberangriffen – Die aktuelle Herausforderung für Bahnbetreiber; ETR-Eisenbahntechnische Rundschau, Oktober 2020, S. 67-69
- [18] Feistle, F.; Kursawe, M.; Lüdicke, D.; Sept, J.; Fanuli, P.: IT-Sicherheit auf Schienenfahrzeugen – Vom gesetzlichen Kontext zur generischen Architektur; ETR-Eisenbahntechnische Rundschau, Oktober 2012, S. 61-66
- [19] Krage, G.: IT-Sicherheit für Software auf Eisenbahnfahrzeugen; El-Eisenbahningenieur, April 2020, S. 37-40
- [20] Schnieder, L.: Safety und Security in der Zulassung von Bahnanwendungen; El-Eisenbahningenieur, Juli 2017, S. 15-19
- [21] Lichtberger, B.: Das große Handbuch der Gleisinstandhaltung, Band 1, tredition Verlag GmbH, Hamburg, 2022

- [22] Stiennon, N.n, et al.: Learning to summarize with human feedback; Advances in Neural Information Processing Systems 33 (2020): 3008-3021.
- [23] Shamshad, F., et al.: Transformers in medical imaging: A survey; Medical Image Analysis (2023): 102802.
- [24] Singer, F.; Pickel, L.; Saric, Z.; Pöchgraber, G.t: Dynamische Detektion und Analyse von Gleiskörpern mittels Machine-Vision; Forschungsk Kooperation zwischen System7 Rail, dem Institut für Fertigungstechnik u. Photonische Technologien der technischen Universität Wien, und dem COMET-Zentrum CDP Center for Digital Production
- [25] EU-Verordnung (EU) 2019/881 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2019 über die ENISA (Agentur der Europäischen Union für Cybersicherheit) und über die Zertifizierung der Cybersicherheit von Informations- und Kommunikationstechnik und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 526/2013 (Rechtsakt zur Cybersicherheit); <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32019R0881>
- [26] Normenreihe IEC 62443 Industrial communication networks – Network and system security;
- [27] Normenreihe ISO/IEC-27000 - Information security, cybersecurity and privacy protection; <https://www.iso27001security.com/>
- [28] IT Grundschatz des Deutschen Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnologie (BSI); https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/IT-Grundschatz/it-grundschatz_node.html
- [29] Public Key Infrastrukturen - Definition nach dem BSI; <https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Oeffentliche-Verwaltung/Elektronische-Identitaeten/Public-Key-Infrastrukturen/public-key-infrastrukturen.html>



Univ.-Doz. Dr. Bernhard Lichtberger
Geschäftsführender Gesellschafter und CTO
Bernhard.lichtberger@s7-rail.com



Dr. Heinrich Schmitzberger
Abteilungsleiter Software Engineering
Heinrich.schmitzberger@s7-rail.com

Beide Autoren:
System7 Railsupport GmbH, AT-Laakirchen