

LocAssysTH[®] – Fahrassistenzsysteme als Schritt zum automatischen Fahren auf der Schiene

Cichon, Martin und Schaal, Roman

Institut für Fahrzeugtechnik Nürnberg,
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

Keywords: Fahr- und Rangierassistenzsystem, Rollprobe, Massenermittlung, Umfelderkennung.

1 Motivation

Personen und Güter zwischen Orten sicher, pünktlich und wirtschaftlich zu transportieren ist seit jeher die Aufgabe und das Ziel der Eisenbahn. Dabei steht sie natürlich im Wettbewerb zum Straßen-, Luft- und Schiffsverkehr. Allen Verkehrsträgern gemeinsam ist, dass durch technische Innovationen die Ziele der Transportaufgabe besser erreicht werden. Dabei ist vor allem die Steigerung der Effizienz, also die Verringerung des Verhältnisses von Aufwand zu Nutzen bei in der Regel steigenden Nutzenanforderungen, Ausdruck stetiger Verbesserung. Im Schienenpersonen- und Güterverkehr stellen Infrastruktur-, Fahrzeug-, Energie- und Personalkosten die wesentlichen Treiber der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) dar [Neu2016]. Der Anteil der Schiene am Güterverkehr in Deutschland betrug 2017 mit 129.961 Mio. Tonnenkilometer nur rund 19 % [Stat2019]. Zur Erreichung der Klimaziele bis 2035 ist dieser Anteil nach dem Wunsch der Politik zu verdoppeln [Schl2019]. Um dies zu erreichen muss neben anderen Maßnahmen die Anzahl der Zugfahrten massiv erhöht werden. Dies erfordert die Zusammenstellung, die Vorbereitung, das Fahren und die Zustellung der Züge. Hierfür ist qualifiziertes Personal erforderlich, welches zu gewinnen und zu halten eine Herausforderung für die EVU darstellt. Ein Schlüssel zur Erhöhung des Anteils qualifizierter Bewerber einerseits und der Steigerung der Effizienz im Betrieb andererseits sind Assistenzsysteme, die das Rangier- und Fahrpersonal in Ihrer Tätigkeit unterstützen und deren Attraktivität und Effizienz

steigern. Die Unterstützung kann in Form von der Bereitstellung zusätzlicher Informationen, über Teilautomatisierung bestimmter Tätigkeiten bis hin zu automatisierten Abläufen erbracht werden.

2 Vollautomatische Rangierlokomotive am Ablaufberg

Das Institut für Fahrzeugtechnik Nürnberg (IFZN) stellte gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Bahnwirtschaft im Jahr 2017 den Demonstrator einer vollautomatischen Rangierlokomotive für den Ablaufbergbetrieb am Rangierbahnhof München Nord vor, Abb. 1 [Cich2018]. Das Fahrzeug ist in der Lage unter definierten Einsatzbedingungen nach Erteilung eines Freigabesignals selbständig aus der Parkposition an einen Wagenzug (zu zerlegende Einheit) in der Einfahrgruppe des Rangierbahnhofs anzusetzen, die Fahrzeugsteuerung an den per Funk angeschlossenen Ablaufsteuerrechner für das Abdrücken der Wagen zu übergeben und anschließend wieder selbständig zur nächsten Zerlegeeinheit umzusetzen. Dabei wird das Lichtraumprofil mit Hilfe der Vehicle Sensor Unit (VSU) auf mögliche Hindernisse oder Personen im Gleis in einem Abstand bis zu 100 m vor der Lokomotive überprüft. Die VSU verarbeitet die Sensorsignale, identifiziert daraus Objekte und klassifiziert diese. Die Positionen und die geometrischen Ausdehnungen der Objekte werden an die zentrale Autonomous Decision and Control Unit (ADCU) weitergeleitet, dort nach vorgegebener Logik des Fahrermodells verarbeitet und als Steuerbefehle für gewünschte Zielzustände an das Power and Brake Control (PBC) Modul weitergegeben, welches direkt in das Antriebs- und Bremssystem des Fahrzeugs eingreift.



Abb. 1: Demonstrator mit Vehicle Sensor Unit, Rbf München Nord

Der Demonstrator ist mit industrieller und selbst erstellter Sensorik in Form von 8-Lagen Laserscannern, Wärmebild- und RGB-Kameras, Radar, einer Antenne zum Empfang von GNSS Signalen, Odometrie sowie Inertialsensorik ausgestattet, an die im Rahmen des Projekts keine Anforderungen hinsichtlich Funktionaler Sicherheit gestellt wurden. Auch die Software und Hardware der Steuerungskomponenten befanden sich in einem Forschungsstand auf Technology Readiness Level TRL 3, Proof of Concept. Aus diesem Grunde war die ständige Überwachung durch einen Lokomotivführer während der Testfahrten auf dem eigens dafür gesperrten Gleis am Rbf München Nord erforderlich. Anders als in [Franz2017] lag der Fokus der vollautomatischen Abdrücklokomotive auf einem Teilgebiet des Rangierens dafür jedoch mit vollem Zugriff des Systems auf die Antriebs- und Bremssteuerung.

In der ADCU liegt der Gleisplan in Koordinatenform sowie weitere Daten der Lokomotive vor, so dass im Hintergrund das Modell eines digitalen Zwillings mit den Entscheidungen des Fahrermodells als Eingangsgröße mitläuft. Das Hauptaugenmerk lag auf zielgenauem und ruckfreiem Ansetzen an die Wagengruppen unter gleichzeitiger Überwachung des Raumes im Bremswegabstand vor der Lokomotive. In Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit ergibt sich mit den aus Vorversuchen ermittelten Anhaltewegen ein mindestens zu überwachender Streckenabschnitt vor der Lokomotive.

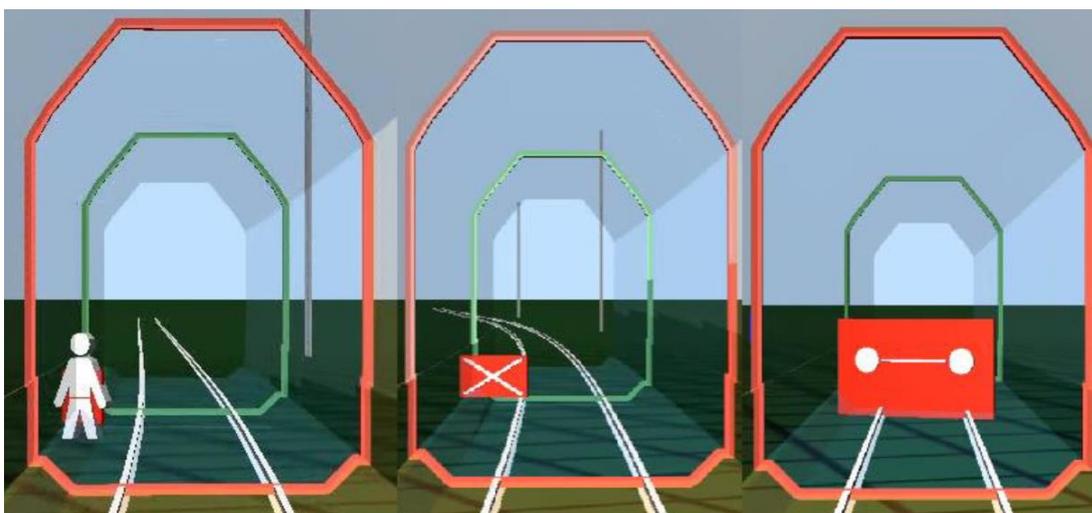


Abb. 2: Im Regellichtraum erkannte Objekte: Person, allgemeines Hindernis, Wagen

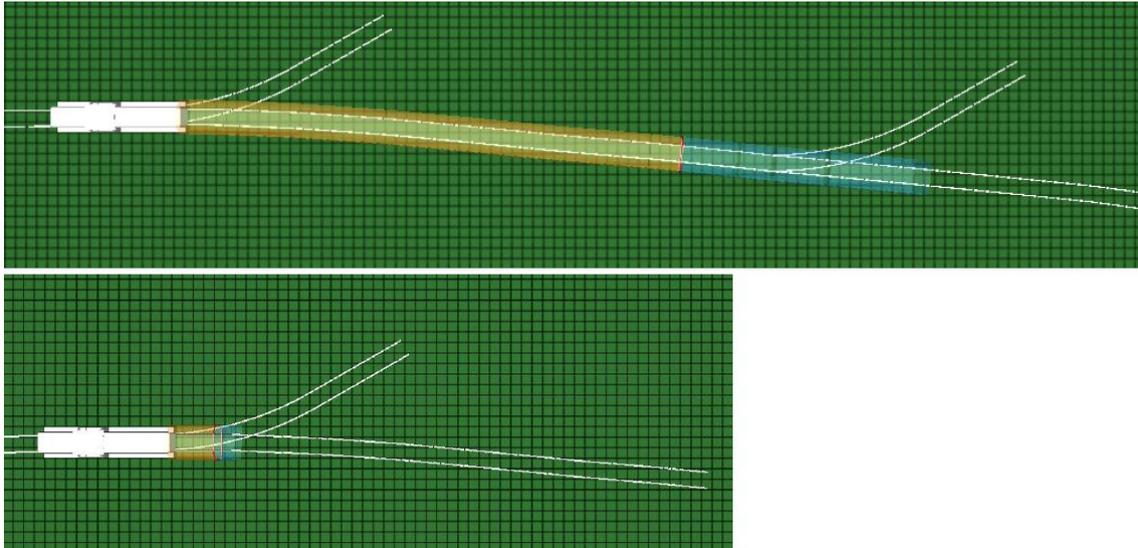


Abb. 3: Beobachtungs- und Anhaltewege (türkis bzw. gelbgrün) der Lokomotive bei 25 km/h (oben) und 5 km/h (unten)

Der modulare Aufbau mit VSU, ADCU und PBC wie in Abb. 4 dargestellt, erwies sich als optimal. So konnte die Sensorik und Umfelderkennung, das Fahrermodell sowie die Steuerung der Lokomotive durch spezifizierte Nahtstellen parallel entwickelt und erprobt werden.

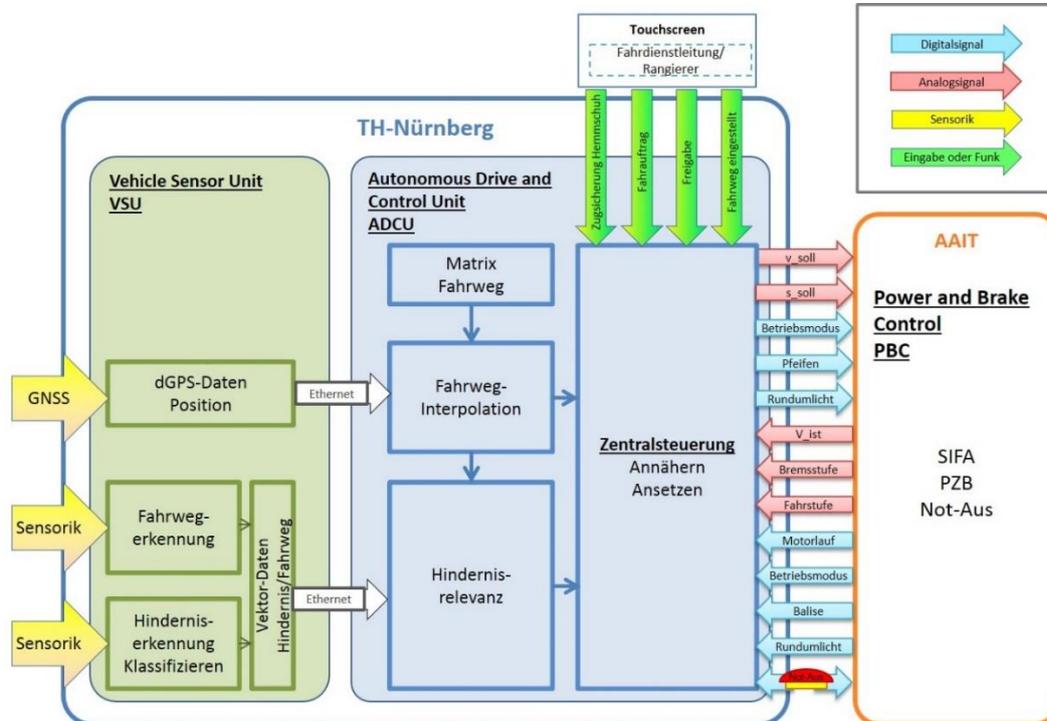


Abb. 4: Schema zum Datenaustausch zwischen VSU, PBC und ADCU

Die bisher verwendeten Algorithmen basieren einerseits auf präziser Ortung des Fahrzeugs und hochgenauer Karten. Für nahe am Lichtraumprofil befindliche Objekte besteht die Herausforderung, dass neben der Position auch die Orientierung des Fahrzeugs auf dem Gleis eine wichtige Größe darstellt. Abweichungen von wenigen Winkelminuten im Gierwinkel wirken sich in größeren Entfernungen hinsichtlich der Zuordnung von Objekten innerhalb oder außerhalb des Lichtraumprofils stark aus. Diese Unsicherheit bedingt eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit. Daher wird im Rahmen der Forschungsarbeiten versucht, die Sensorfusion über die Kenntnis des Schienenverlaufs im Kamerabild zu verbessern.



Abb. 5: Fahrwegerkennung

3 Assistenzsysteme

Der spurgeführte Verkehr ist prädestiniert für eine Automatisierung da er stringent an Ablaufprozessen orientiert ist. Auch das Fahren auf Signalsicht, gestellte und gesicherte Fahrwege sowie der grundsätzlich vorhandene Vorrang vor anderen Verkehrsteilnehmern sind systemimmanente Voraussetzungen, die eine Automatisierung naheliegend erscheinen lassen. Auf der anderen Seite muss bei der Automatisierung und auch beim autonomen Fahren bei Eisenbahnen zwingend ein erheblicher Teil in die Infrastruktur investiert werden. Diese Tatsache und die auf absehbare Zeit fehlende gesetzliche Grundlage für autonomes Fahren wird eine kurz- oder mittelfristige Einführung solcher Systeme in der Breite erschweren. Nach Auffassung der Autoren sollten daher Zwischenschritte unternommen werden, die Effizienz im Schienengüterverkehr durch (Teil-)Automatisierung zu steigern. Dazu gehört die Automatisierung von Nischenanwendungen wie der Ablaufbetrieb in Zugbildungsanlagen aber auch Assistenzdienste auf der Basis automatisierter Teilaufgaben.

Der Ansatz besteht darin, diejenigen Aufgaben zu automatisieren, die einerseits für sich genommen bereits eine Effizienzsteigerung und Erhöhung der Sicherheit nach sich ziehen und andererseits in einem vollautomatischen oder autonomen Betrieb von essentieller Bedeutung sein werden. Dies führt durch die Aufteilung in kleinere Innovationsschritte zu geringeren Entwicklungsrisiken, zu einer schnelleren Markteinführung und zu einer Erhöhung der Akzeptanz gegenüber der Entwicklung eines kompletten voll autonomen Bahnsystems. Ein weiterer Vorteil bei der Einführung von Assistenzsystemen liegt darin, dass häufig bereits mit dem Einsatz des ersten Systems die Vorteile wirksam werden, während für voll autonome Systeme ein Großteil der oder sogar die gesamte Flotte und möglicher Weise auch der Infrastruktur umgerüstet sein muss, um Wirksamkeit zu zeigen.

Betrachtet werden bereits eingeführte oder in der Entwicklung befindliche Assistenzsysteme sowie neue Ansätze, die im Rahmen der angewandten Forschung am IFZN untersucht werden, wie beispielsweise

- Selbsttätiges, zielgenaues und ladungsschonendes Ansetzen der Lokomotive an einen Zug
- Assistiertes oder automatisiertes Nachschieben
- Vorrücken um eine bestimmte Streckenlänge, z.B. an Be- und Entladestationen
- Bestimmung der angehängten Wagenzugmasse
- Durchführung und Auswertung der Rollprobe zur Detektion von befahrenen Hemmschuhen
- Bremsprobeunterstützung
- Bewertung der Bremswirkung
- Überwachung des freien Lichtraums und Fahrwegs vor dem Fahrzeug mit Hinderniserkennung, z.B. Gleissperren
- Erkennen und Anzeige von Fahrinformationen (Signalstellung, Streckenhöchstgeschwindigkeit, Streckenkilometrierung, ...)
- Rangieren mit Endführerstandlokomotiven ohne Führerstandswechsel
- Rangieren ohne besetzte Spitze
- Verschriftlichung diktiert Befehle
- Absetzung eines Notrufs

Aus der Erfahrung mit dem Demonstrator der vollautomatischen Abdrücklokomotive können direkt die Assistenzfunktionen des Ansetzens an einen Zug, das Rangieren mit Streckenlokomotiven ohne Führerstandswechsel und das automatisierte Nachschieben abgeleitet werden. Solange die Lokomotive nur alleine fährt, sind die Antriebs- und Bremskurven in der Software hinterlegt. Mit Anhängelast hängt die Abschätzung der Bremswege jedoch zusätzlich von der Masse der angehängten Wagen und bei gekuppelter

Bremsleitung auch vom Bremsvermögen des Zuges ab. Für den durchaus häufig auftretenden Fall des Rangierens mit ungebremsten Wagen kommt der Massenbestimmung eine wichtige Bedeutung zu. Ein Lokführer kann aufgrund seiner Erfahrung mit der Anzahl der Wagen und einer Schätzung der Beladung Rückschlüsse auf das Bremsverhalten ziehen. Ein Assistenzsystem erhält diese Information heute zwar für Zugfahrten, in der Regel jedoch nicht für Rangierfahrten. Aus den Daten der Antriebsteuerung müssen hierzu die Zugkraft F_z und die Beschleunigung a ermittelt werden. Aus der Grundgleichung der Fahrdynamik

$$F_z = W_r + W_s + W_b + W_L + W_k$$

ergibt sich die Zugkraft aus der Summe des Rollwiderstandes W_r , des Neigungswiderstandes W_s , des Beschleunigungswiderstandes W_b , des Luftwiderstandes W_L und des Bogenwiderstandes W_k . Unter der Voraussetzung zweier kurz aufeinander folgender Messungen der Längsbeschleunigung kann näherungsweise angenommen werden, dass sich die Neigungs-, Luft- und Bogenwiderstände zu beiden Zeitpunkten nicht unterscheiden und wegen des konstant bleibenden Rollwiderstandes ergibt sich

$$m \lambda = \frac{\Delta F_z}{\Delta a}$$

mit der Gesamtmasse des Zuges m , dem Drehmassenfaktor λ , der Zugkraftdifferenz ΔF_z und der Beschleunigungsdifferenz Δa . Je größer Zähler und Nenner des Quotienten, desto genauer fällt die Massenschätzung aus. Idealerweise entsteht eine Messung bei zugkraftfreiem Lauf. Mit kontinuierlicher Aufzeichnung dieser Größen und in Kombination mit Streckendaten kann schließlich eine größere Genauigkeit erzielt als auch die Neigung, der Rollwiderstand, der Bogenwiderstand und der Luftwiderstand ermittelt werden. Mit der Zugmasse und den hinterlegten Bremskräften ergeben sich so die Anhaltewege für die Rangiereinheit. Das System kann auch genutzt werden, um das Bremsvermögen, veränderliche Reibwerte und Zeitkonstanten im Bremssystem von Zügen zu ermitteln.

Zum Sichern von Wagenzügen gegen Wegrollen werden vor allem im Bereich von Zugbildungsanlagen Hemmschuhe verwendet, die, auf den Schienenkopf gelegt, beim Aufahren eines Radsatzes dessen Abroll- zu einer Gleitbewegung mit wesentlich größerer Widerstandskraft wandeln und schließlich ein Weiterrollen verhindern. Dabei kommt es in Deutschland jährlich zu 70 bis 80 Entgleisungen wegen vergessener Hemmschuhe mit zum Teil erheblichen Sachkosten und Verzögerungen im Betriebsablauf [Heinz2011]. Auslöser für die vorliegende Untersuchung waren zwei vergessene Hemmschuhe am Umschlagbahnhof München Riem am 28.04.2018, die zu einem Schaden in Höhe von 4 Mio EUR führten.



Abb. 6: Hemmschuh zur Sicherung eines Wagenzuges

Die zu Sicherungszwecken vor die Räder eines bereitgestellten Zuges gelegten Hemmschuhe wurden nicht entfernt und infolge der Abfahrt des Zuges unter den Rädern gleitend mitgeschleift, bis sie sich in einer Weiche verkeilten und so mehrere Radsätze entgleisten.

Es stellte sich die Frage, ob mit einem technischen System notfalls vergessene Hemmschuhe noch rechtzeitig bemerkt werden könnten. Ansatzpunkt ist die bei der Abfahrt durchzuführende Rollprobe nach der Richtlinie „Triebfahrzeuge bedienen“. Hierbei wird zunächst mit mäßiger Zugkraft das Fahrzeug oder der Zug in Bewegung gesetzt und sodann frei rollen gelassen. Es obliegt nun dem Gefühl des Triebfahrzeugführers zu entscheiden, ob der Zug einwandfrei rollt. Ein technisches System zur Überwachung einer Rollprobe wird in [Burg2010] beschrieben. Es vergleicht die Raddrehzahl mit der Bewegungsgeschwindigkeit eines Fahrzeugs und kann so auf blockierte Räder schließen. Dieses System eignet sich nur für vergessene Hemmschuhe unter Triebfahrzeugen und wäre in der vorliegenden Aufgabenstellung keine Lösung. Untersucht wurde daher ein System, welches auf Basis der gemessenen Längsbeschleunigung bzw. -verzögerung und der korrespondierend aufgebrauchten Zugkräfte unter Einbezug der Streckendaten eine abweichend hohe Verzögerung detektiert und entsprechend anzeigt. Für den einfachsten Fall bei Windstille im geraden und ebenen Gleis ergibt sich für die Verzögerung bei freiem Rollen aus der Grundgleichung der Fahrdynamik

$$a = -c_r \frac{g}{\lambda}$$

mit dem Rollwiderstandsbeiwert c_r und dem Drehmassenfaktor λ , der für Güterzüge im Bereich zwischen 1,05 (beladen) und 1,15 (leer) liegt. Bei einem neu gebildeten Zug liegen in der Regel keine Daten über Rollwiderstandsbeiwerte und Drehmassenfaktor vor, so dass hierfür eine Annahme getroffen werden muss. Für einen Zug mit 100 Achsen ändert sich das Verzögerungsverhalten um Δa , wenn unter einem Radsatz ein Hemmschuh vergessen wurde zu

$$\Delta a = -\left(c_r + \frac{\mu_{HS}}{100}\right) \frac{g}{\lambda},$$

wobei hierbei vereinfachend unterstellt wurde, dass alle Radsätze die gleiche Radsatzlast aufweisen. Je nach Werten für Rollwiderstand c_r und Gleitreibungskoeffizient zwischen Hemmschuh und Schiene μ_{HS} erhöht sich die Verzögerung um 50 bis 100 %. Ein Assistenzsystem zur automatischen Durchführung und Bewertung der Rollprobe erscheint sinnvoll und machbar, wenn die Streckenneigung und ein gegebenenfalls vorhandener Gleisbogen mit berücksichtigt werden. Da die Rollprobe nur bei niedrigen Geschwindigkeiten durchgeführt werden sollte, ist die Kenntnis des Luftwiderstands zumindest bei niedrigen Windgeschwindigkeiten nicht erforderlich, könnte aber als Zusatzinformation bspw. durch die Erhebung aktueller Infrastrukturdaten berücksichtigt werden. Für die Rollprobe und für die Massenermittlung werden die gleichen Sensorinformationen des Fahrzeugs verarbeitet.

Eine weitere Funktionalität, die derzeit untersucht wird, ist die Erkennung von Lichtsignalen, um diese in das Display des Triebfahrzeugs oder in einem mobilen Gerät anzuzeigen. Beim Rangieren mit unbesetzter Zugspitze ist dies unabdingbare Voraussetzung. Derzeit werden hierfür Signale des schweizerischen Signalsystems mit Hilfe von Deep-Learning Algorithmen und neuronalen Netzen mit Bildern aus Streckenvideos trainiert.



Abb. 7: Erkennung schweizerischer Lichtsignale

Die Erkenntnisse aus diesen und weiteren Untersuchungen werden unter der Marke LocAssysTH® der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm zusammengefasst und weiterentwickelt. Ziel ist es, ein modular aufgebautes Assistenzsystem zu schaffen, welches zunächst als Zusatzfunktion mit direktem Nutzen implementiert werden kann. Eine schrittweise Erweiterung mit neuen Funktionen soll dann nach und nach Teilaufgaben automatisieren.

4 Literatur

- [Neu2016] Neumann, Krippendorf: Branchenanalyse Bahnindustrie, 2016:
- [Cich2018] Cichon, M., Schaal R.: Vollautomatische Abdrücklokomotive – Machbarkeitsstudie und Aufbau eines Demonstrators, Rad-Schiene Tagung Dresden, 2018
- [Stat2019] Destatis: Güterverkehr Beförderungsmenge und Beförderungsleistung nach Verkehrsträgern, 2019
- [Schl2019] Schlautmann, C.: Bundesregierung will Transporte auf der Schiene bis 2030 fast verdoppeln, Handelsblatt, 25.06.2019
- [Hein2011] Heinz, A.: Hemmschuhe – Vergessen gilt nicht, Bahn-Praxis 04.2011
- [Franz2017] Franzen, J., Pinders, U., Schreiber, W., Kuhlenkötter, B.: Erhöhung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Rangierens durch ein innovatives Assistenzsystem, Eisenbahntechnische Rundschau, 06.2017
- [Burg2010] Burg, W.: Verfahren zur Durchführung einer Rollprobe bei einem Schienenfahrzeug und Steuerungseinrichtung dafür, Offenlegungsschrift Deutsches Patent- und Markenamt DE 102008052906

Autoren



Cichon, Martin

Martin Cichon studierte bis 1997 Maschinenbau mit Vertiefung Schienenfahrzeugtechnik an der RWTH Aachen und begann seine berufliche Laufbahn als Entwicklungs- und Berechnungsingenieur bei der Schweizerischen Lokomotiv- und Maschinenfabrik Winterthur. Nach seiner Promotion im Jahr 2005 an der Universität Karlsruhe und diversen Positionen in Forschung, Vorausentwicklung und Risikomanagement bei der Robert Bosch GmbH wurde er 2014 als Professor an die Technische Hochschule Nürnberg berufen. Seit 2016 leitet er das Institut für Fahrzeugtechnik Nürnberg.



Schaal, Roman

Roman Schaal studierte bis 2013 Maschinenbau an der TH Nürnberg und arbeitete als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik Nürnberg. Er promoviert am Lehrstuhl für Schienenfahrzeugtechnik der Universität Stuttgart.