

Kartengestützte GNSS / Multi-Sensor-Ortung von Schienenfahrzeugen

Die Daten fahrzeuggetragener Systeme und digitale Karten werden durch intelligente Algorithmen zu genauen Positionen und Geschwindigkeiten verarbeitet.

MICHAEL ROTH | JUDITH HEUSEL |
JÖRN GROOS

Genau und verlässliche Informationen über die Positionen und Geschwindigkeiten von Schienenfahrzeugen im Gleisnetz sind essenziell für zahlreiche Anwendungen der Digitalisierung und Automatisierung des Bahnsystems. Der vorliegende Beitrag gibt Einblicke in die Entwicklung von Ortungslösungen mit fahrzeuggetragener Sensorik (z. B. inertialen Messeinheiten – Inertial Measurement Units (IMU), Satellitennavigation – Global Navigation Satellite Systems (GNSS)) und digitalen Kartendaten. Unterschiedliche Probleme werden kategorisiert und Algorithmen aus dem Bereich der Sensordatenfusion (z. B. Kalman Filter) für deren Lösung motiviert. Schließlich werden Empfehlungen für die weitere Forschung und Entwicklung formuliert.

Einleitung

Ortung ist eine Schlüsselkomponente für viele Anwendungen im Bahnbereich. Die Erfassung von Positionen und Geschwindigkeiten ist notwendig, um z. B. Informationen für Fahrgäste bereitzustellen, Messungen aus Erfassungstechnik mit dem Zustand einzelner Infrastrukturelemente zu verbinden [1], die Kapazität des Gleisnetzes durch Moving-Block-Betrieb zu erhöhen [2] und schließlich autonomes Fahren (ATO) zu realisieren [3]. Eindeutig haben die Anwendungen unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit, Verfügbarkeit, Sicherheit und Verarbeitungszeit (Abb. 1). Gemeinsam ist jedoch, dass sie prinzipiell mit fahrzeuggetragenen Sensoren und Systemen gelöst werden können. Dies reduziert einerseits die Abhängigkeit von strecken-seitigen Systemen (z. B. Balisen) und vereinfacht andererseits die Interoperabilität (z. B. im europäischen Streckennetz).

Das Ökosystem für die Entwicklung von Ortungslösungen ist komplex. Eisenbahnunternehmen, Technologieanbieter und Forschungseinrichtungen treten als Stakeholder mit unterschiedlichen Interessen auf. Große Förderinitiativen spielen eine wichtige Rolle (z. B. EU-Rail¹). Die Anzahl der aktiven Forschungsgruppen und die Fachliteratur zur Algorithmik sind eher überschaubar im

Vergleich zum Bereich Automotive. Interessante Quellen sind beispielsweise [4] als früher Ansatz für die Nutzung von Kartendaten und IMU, [5] mit GNSS und probabilistischen Algorithmen sowie die Doktorarbeiten [6] und [7]. Ein umfassender Überblick wird aktuell durch die Autoren als Fachartikel vorbereitet. Im Bahnbereich müssen strenge und notwendige Regularien beachtet werden, was die Einführung von neuen Ideen erschweren kann. Dies gilt besonders bei der Ortung, da keine einzelne Sensortechnologie die gewünschte Funktionalität günstig und allumfassend bereitstellen kann. Die Kombination von unterschiedlichen Sensordaten mit digitalen Karten zeichnet sich als vielversprechende Lösung ab. Da eine solche kartengestützte Fusion durchaus komplex ist, ist der Wissenstransfer aus der Forschung in die Praxis besonders wichtig. Algorithmen müssen modular und erklärbar sein, um zulassungsfähig zu werden. Die letzten Jahre haben viele nützliche Entwicklungen gebracht. Mit dem Smartphone ist die notwendige Sensorik (GNSS, IMU) und Rechentechnik im Prinzip allgegenwärtig (wenn auch als maximal günstige Variante). Experimentelle Datensätze [8] stehen zur Verfügung. Software-Bibliotheken (Python, C++) sind oft offen zugänglich und können agil integriert und weiterentwickelt werden. Open-Source-Software für die Ortung wird folgen und zur Verbreitung und Umsetzung von Ortungslösungen beitragen.

Technische Herausforderungen

Der Begriff Ortung wird in diesem Artikel für die bestmögliche Schätzung von Positionen und Bewegungsinformationen aus den Daten fahrzeuggetragener Sensoren verwendet. Onlineanwendungen der Ortung werden nah an der Sensorik ausgeführt, typischerweise auf dem Fahrzeug. Unterschiedliche Sensorquellen liefern Datenströme, welche algorithmisch kombiniert werden, um einen Datenstrom von z. B. Positionen und Geschwindigkeiten zu erzeugen. Onlineortung kann z. B. für Regelungszwecke genutzt werden, um die Geschwindigkeit und Position des Fahrzeugs gezielt zu beeinflussen. Im Gegensatz dazu stehen Offlineanwendungen, bei denen zunächst sämtliche Sensordaten aufgezeichnet und im Nachhinein verarbeitet werden. Die Georeferenzierung oder Verortung von Messdaten für die vergleichende Analyse (z. B. Fahrzeugvibrationen aus mehreren Überfahrten) ist ein Beispiel. Wegen der größeren Menge an Informationen lassen sich bei Offlineortung die Schätzfehler systematisch reduzieren. Die auf Schienenfahrzeugen verwendeten Sensoren sind oft komplex, weshalb der Begriff Systeme ebenso passend ist (Abb. 2). Satellitennavigation auf dem Fahrzeug benötigt eine Antenne und einen Empfänger für die GNSS-Signale von z. B. GPS und Galileo [9]. Informationen aus den GNSS-Signalen werden im Empfänger algorithmisch zu Positionen verrechnet

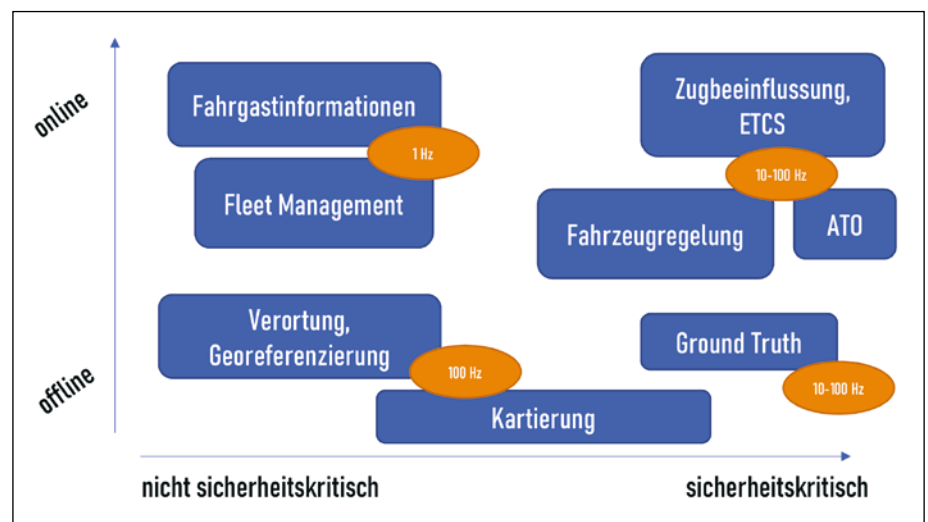


Abb. 1: Ortungsanwendungen und deren beispielhafte Kategorisierung nach Sicherheit und Verarbeitungszeit

¹<https://rail-research.europa.eu/>

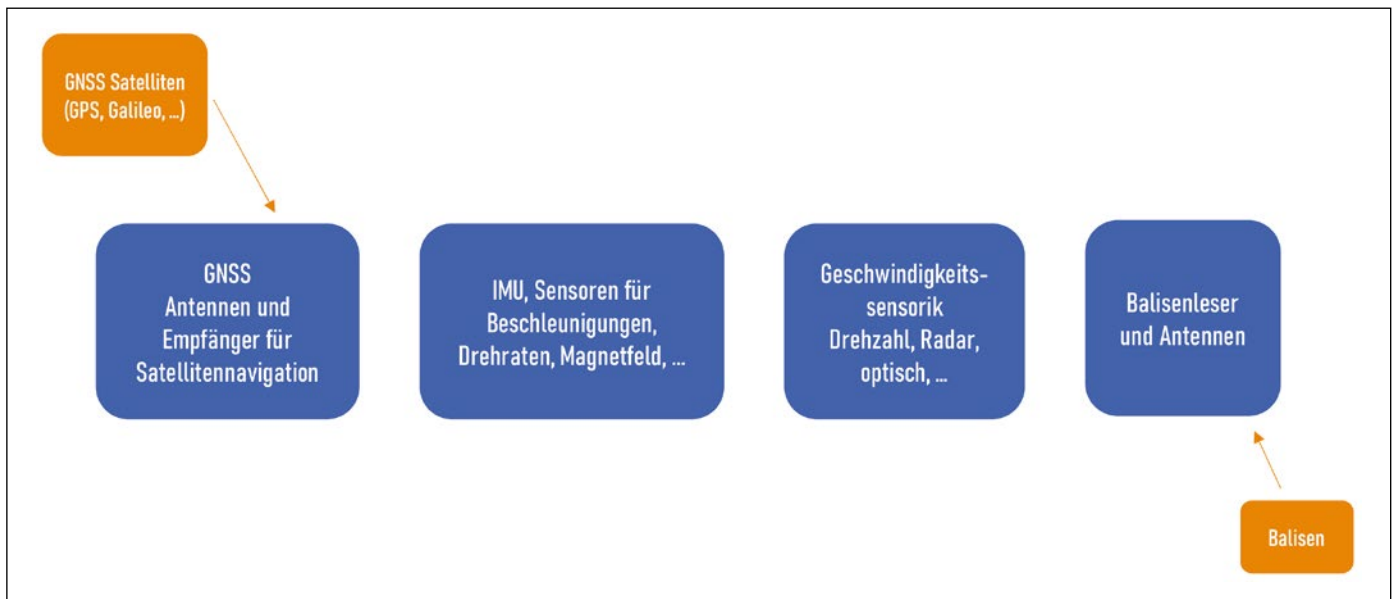


Abb. 2: Beispielkonfiguration fahrzeuggetragener Sensoren und Systeme für die Ortung von Schienenfahrzeugen

und nicht direkt gemessen. Inertiale Messeinheiten (IMU) [10] enthalten Sensoren für Beschleunigungen und Drehraten. Gemessen wird im Koordinatensystem der IMU und meist in alle drei Raumrichtungen. Üblich in IMU sind zudem Magnetometer sowie Sensoren für Temperatur und Luftdruck. Günstige IMU-Sensorik ist als Mikrosystemtechnik (MEMS) realisiert. Wie bei GNSS-Empfängern stellen IMU mitunter intern errechnete Größen bereit, z. B. Winkel oder rotierte Beschleunigungen. Systeme für die Erfassung von Geschwindigkeiten im Bahnbereich sind z. B. Impulsgeber am Rad für die Drehzahlmessung, Radare sowie optische Lösungen. Neuartige Konzepte für die Erfassung von elektromagnetischen Größen als Positions- und Bewegungssensor werden aktuell entwickelt [11, 12, 13].

Jedes der zuvor genannten Systeme bringt Herausforderungen und Fehlerquellen für die Ortung mit sich. GNSS-Empfänger benötigen Satellitensicht, die oft nicht vorhanden (Tunnel) oder eingeschränkt (Dächer im Bahnhofsbereich) ist. Lokale Effekte (GNSS multipath, non-line-of-sight) lassen sich nicht vollständig durch avancierte GNSS-Techniken (Korrektursignale, RTK, PPP) kompensieren. Die Signalübertragung über die Luft bietet zudem einen Angriffspunkt für beabsichtigte Störungen (GNSS jamming). GNSS-Datenraten von ca. 1 bis 10 Hz sind üblich. MEMS-IMU bieten Raten von ca. 100 Hz, weisen jedoch typische Kalibrierfehler auf. So beinhalten die gemessenen Beschleunigungen und Drehraten langsam veränderliche und temperaturabhängige Offset-Fehler, welche geschätzt werden müssen. Aus Beschleunigungen und Drehraten lassen sich per Integration Geschwindigkeiten und Positionen ableiten, was jedoch nur für kurze Zeitintervalle funktioniert. Geschwindigkeiten aus Radumdrehungen sind anfällig für Schlupf. Optische und radarbasierte Alternati-

ven können durch die Witterung beeinträchtigt werden.

Schienenfahrzeuge zeichnen sich durch ihre Spurführung mittels Gleisen aus, ein Gleiswechsel ist bei Zugfahrten dabei nur an Weichenelementen möglich. Mithilfe von digitalen Schienekarten kann dieser Sachverhalt für die Ortung genutzt werden. Hierbei ist nicht nur die Qualität und Integrität der Kartendaten eine Herausforderung, sondern ebenso die Einbindung in die Ortungsalgorithmenik.

Sensordatenfusion als geeignete Lösung

Ortungsalgorithmen müssen die Daten mehrerer Sensoren und Systeme unter Berücksichtigung der individuellen Fehler kombinieren. Werkzeuge aus dem Bereich der Sensordatenfusion sind hierfür besonders gut geeignet und seit der Mondlandung in vielen Bereichen im Einsatz [14]. Besonders wichtig sind Kalman Filter (KF) in unterschiedlichen Varianten [15].

Die Basis für KF sind Zustandsraummodelle (state space models). Die unbekannt Variablen (Positionen, Geschwindigkeiten etc.) werden in einem zeitabhängigen Zustandsvektor (state vector, $x(t)$) zusammengefasst. Die zeitliche Veränderung des Zustands wird durch eine Bewegungsgleichung (motion model, state difference equation) modelliert. Unsicherheiten in der Transition von einem Zeitschritt t zum nächsten $t+1$ werden mithilfe von Rauschvariablen (process noise) adressiert. Entkoppelt von der Dynamik des Zustands können die Sensoren und deren Daten (z. B. $y_A(t)$, $y_B(t)$, $y_C(t)$) für drei Sensoren A , B , C) modelliert werden. Jeder Sensor erhält hierbei eine separate Messgleichung (measurement models, equations). Auch hier werden Unsicherheiten durch Rauschvariablen (measurement noise) beschrieben. Die jeweiligen Sensordaten müssen nicht für alle Zeitschritte t vorliegen.

Sind die Gleichungen näherungsweise linear und lassen sich die Rauschgrößen gut durch einen Mittelwert und eine Kovarianzmatrix beschreiben, so bieten KF eine attraktive Lösung. Zum Start des KF werden aus initialen Sensordaten und Vorwissen ein initialer Schätzvektor (initial state estimate, $\hat{x}(0)$) und eine initiale Schätzkovarianz (initial state covariance, $P(0)$) errechnet. Diese zwei Größen werden im Folgenden rekursiv durch Update-Routinen aktualisiert. Jeder Zeitschritt t beinhaltet ein KF-Zeit-Update, welches das Bewegungsmodell einbindet und die Schätzung für einen Zeitschritt prädiziert (von $\hat{x}(t-1)$, $P(t-1)$ zu $\hat{x}_{pred}(t)$, $P_{pred}(t)$). Bei vorhandenen Messungen zum Zeitpunkt t werden anschließend KF-Mess-Updates für alle vorliegenden $y_A(t)$, $y_B(t)$, ... durchgeführt. Hierbei müssen für separate KF-Mess-Updates die Sensoren A , B , ... unabhängige Quellen sein (z. B. GNSS-Empfänger und IMU). Die KF-Theorie für lineare Modelle bietet Resultate zu Robustheit, Konvergenz, erreichbaren Grenzen des Schätzfehlers und Implementierung. Da die Zustandstransitionen und Messgleichungen allzu oft nichtlinear sind, werden nichtlineare KF-Adaptionen verwendet, im einfachsten Fall auf Basis von Linearisierung. Das eigentliche KF-Design von der Wahl des Zustandsvektors bis zur Ausgestaltung der einzelnen Updates und deren Reihenfolge ist avancierte Ingenieursarbeit. Anwendbare Best Practices der Sensordatenfusion sind z. B. die Modellierung aller Gleichungen und Rauschgrößen nah an der Physik, Mess-Updates mit dem „besten Sensor zuerst“ bei mehreren Messungen zum Zeitschritt t oder numerisch robuste Berechnungen in den KF-Updates (Gleichungssysteme lösen statt Matrix-Inversion). Statt im KF-Mess-Update ist es auch möglich, Sensordaten im KF-Zeit-Update als verrauschte Eingangsgrößen einzubinden. Abb. 3 illustriert ein KF-Beispiel mit den funktionalen Update-Blöcken für zwei Sensoren A und B .

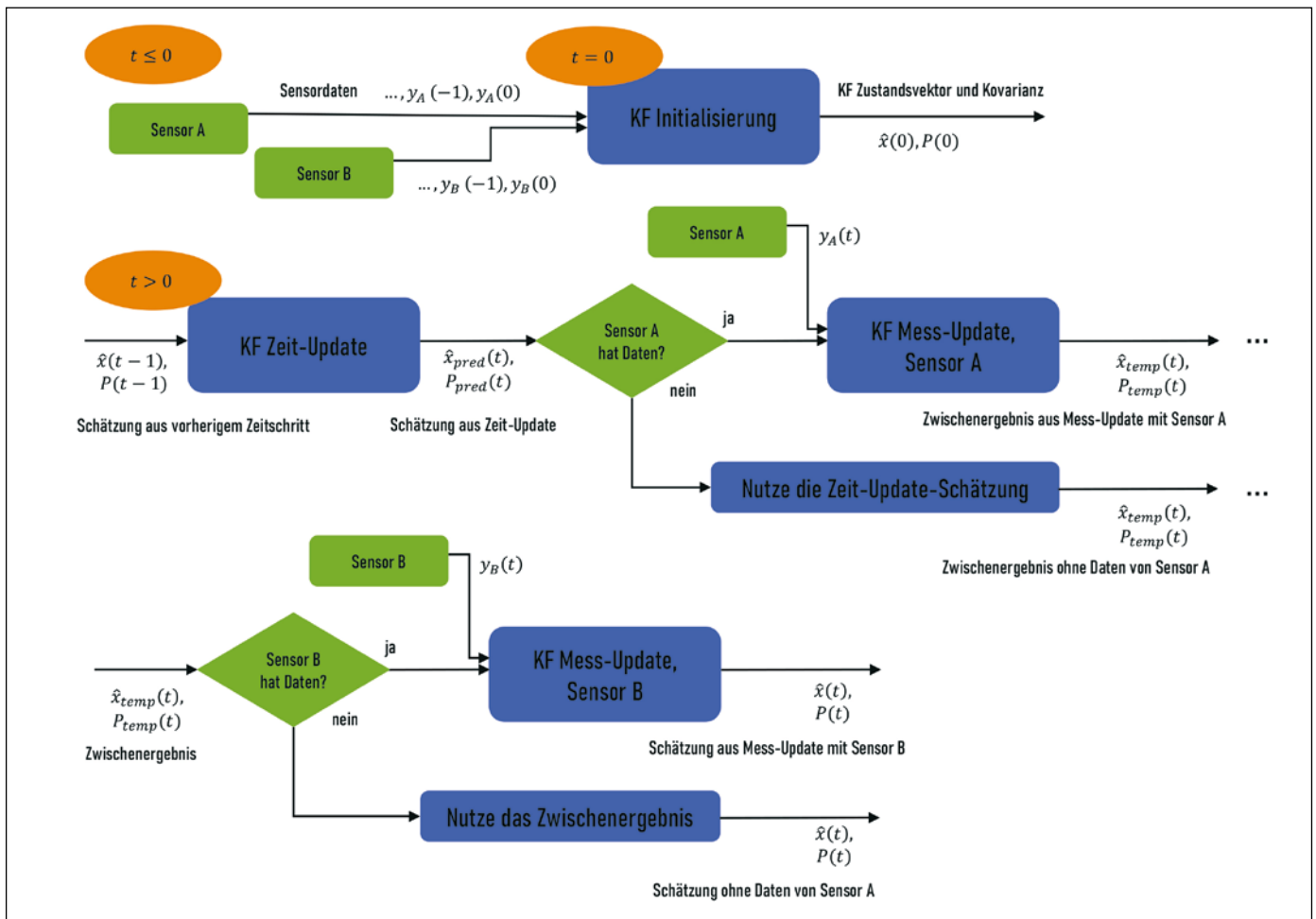


Abb. 3: Verarbeitungsschritte für ein Kalman-Filter-Beispiel mit zwei Sensoren A und B

KF haben viele positive Eigenschaften. Der Algorithmus ist modular und besteht aus wenigen Update-Schritten, welche separat analysiert, getestet und in das KF eingebunden werden können. Das Hinzufügen einer weiteren Sensorquelle wird durch ein entsprechendes KF-Mess-Update realisiert. Die Datenraten der Sensoren und die des KF sind entkoppelt. Auch bei nur sporadisch vorliegenden Messungen mit Datenlücken liefert ein KF Schätzungen mit konstanter Rate. Unsicherheiten in Messungen und Bewegungsmodellen sind Teil eines jeden KF. Sorgfältig entworfene KF liefern interpretierbare Varianzen und Standardabweichungen für z.B. Fehler in den Positions- und Geschwindigkeitsschätzungen für jeden Zeitschritt. Mit dem Rauch-Tung-Striebel-Smoother [15, 16] können die KF-Resultate in Offlineanwendungen verbessert werden. Hierbei wird zunächst ein KF für die Prozessierung der Sensordaten ausgeführt. KF-Zwischenergebnisse werden dann in einer Art KF-Iteration vom letzten zum ersten Zeitschritt zu Smoother-Schätzungen verarbeitet, wobei sich besonders die Fehler in Zeitintervallen mit Datenlücken (z.B. GNSS-Ausfälle, Tunnel) systematisch verbessern lassen. KF sind etablierte Werkzeuge, die – richtig entworfen und eingestellt – robuste und besonders gute Schätzergebnisse liefern können.

Die Einbindung von Kartendaten ist eine Herausforderung für KF, da die Unsicherheiten im Fall von Weichenüberfahrten nicht mehr gut durch einen Mittelwert und eine Kovarianzmatrix beschrieben werden können. Das Fahrzeug befindet sich schließlich auf einem der möglichen Pfade im Gleisnetz, wobei ein Pfad als Sequenz von Gleisabschnitten verstanden werden kann. Auf einem solchen Pfad ist das Schätzproblem jedoch vereinfacht, da sich die Position durch eine skalare Distanz beschreiben lässt. Es bietet sich daher an, mit Pfadhypothesen zu arbeiten. Pfadhypothesen können aus Kartendaten generiert und aktualisiert werden. Sensordaten können für die Bewertung von Pfaden herangezogen werden. Für jede Pfadhypothese kann ein KF für die Schätzung von Positionen genutzt werden. Das Management von Pfadhypothesen ist jedoch nicht trivial und unterschiedlich für Online- und Offlineanwendungen.

Ausblick und Empfehlungen

Aus wirtschaftlichen Gründen sind Onboard-Lösungen mit fahrzeuggetragenen Sensoren und Systemen besonders interessant. Kartengestützte Ortungsalgorithmen können für die Lösung von Online- und Offlineanwendungen herangezogen werden. KF lösen hierbei flexi-

bel, robust und akkurat Schätzprobleme für einzelne Pfadhypothesen.

Die Entwicklung der Algorithmik ist alles andere als trivial, hat jedoch viele Parallelen zu Schätzproblemen in anderen Domänen. KF und Best Practices der Sensordatenfusion sind hierfür relevant. Wissenstransfer von der Forschung in die Industrie ist notwendig, um praktische Ortungsprobleme zu lösen, zum Verständnis der Algorithmen beizutragen und schließlich Aspekte der Zulassung für sicherheitskritische Anwendungen zu klären. Aufgrund der zentralen Rolle von Algorithmen und deren Implementierung gewinnt das Thema Software an Relevanz. Für die kollaborative Entwicklung arbeiten die Autoren an Open-Source-Software, welche zukünftig in unterschiedlichen Modellen der Zusammenarbeit mit Stakeholdern genutzt und weiterentwickelt werden kann. So wird neben der Veröffentlichung von Daten [8] ein wichtiger Beitrag zur Digitalisierung und Automatisierung des Bahnsystems geleistet. Die Offenheit trägt zur Verbreitung des Wissens und damit zu einer zeitgemäßen und nachhaltigen Entwicklung bei. Das etablierte Verständnis von z.B. modularer KF-Algorithmik minimiert Risiken der Stakeholder und reduziert Abhängigkeiten von Insellösungen. ■

Danksagung

Die Arbeiten zu OfflineOrtung werden im mFUND-Projekt OnboardEU durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr unterstützt.

QUELLEN

- [1] Baasch, B.; Groos, J. C.; Roth, M.: „Sensorgestützte Anomaliedetektion zur Zustandsbewertung der Schiene mit Regelzügen,“ ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 12/2018, S. 32–35. [Online]. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/121905/>
- [2] van Hövell, M.; Kumar, M.-K.; Boloukian-Roudsari, R.: „Auswirkungen des Vertrauensintervalls auf Kapazität und Pünktlichkeit des Bahnsystems,“ ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 11/2022, S. 44–49
- [3] Hofmann, K.; Tagiev, R.; Tilly, R.; Klotz, C.; Reinhardt, M.: „Standortbestimmung des DZSF zum Thema ATO: Teil 1: Grundlagen und Sicherheitsanforderungen,“ EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 2/2023, S. 35–38
- [4] Saab, S.: „A map matching approach for train positioning. I. Development and analysis,“ IEEE Trans. Veh. Technol., Jg. 49, 2/2000 S. 467–475, doi: 10.1109/25.832978
- [5] Lauer, M.; Stein, D.: „A Train Localization Algorithm for Train Protection Systems of the Future,“ IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, S. 1–10, 2014, doi: 10.1109/ITITS.2014.2345498

- [6] Heirich, O.: „Localization of Trains and Mapping of Railway Tracks,“ Dissertation, Technische Universität München, München, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1495916>
- [7] Winter, H.: „Ortung von Schienenfahrzeugen und Kartierung von Bahntrassen unter Ausnutzung geometrischer Trassierungselemente,“ Technische Universität Darmstadt, 2022
- [8] Roth, M.; Winter, H.: „An Open Data Set for Rail Vehicle Positioning Experiments,“ in 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Rhodes, Greece, 2020, S. 1–7, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294594
- [9] Teunissen, P. J.; Montenbruck, O.: Hg. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017
- [10] Groves, P. D.: Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, 2. Aufl. Boston: Artech House, 2013
- [11] Heirich, O.; Siebler, B.; Lehner, A.; Strang, T.; Sand, S.: „Magnetic Train Localization: High-Speed and Tunnel, Experiment and Evaluation,“ in Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022), Denver, Colorado, 2022, S. 1859–1863, doi: 10.33012/2022.18537
- [12] Ostaszewski, K.; Heinisch, P.; Struckmann, H.; Hinz, M.; Apitius, M.: „Magnetische Odometrie – Neuartige Methode zur Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit von Schienenfahrzeugen,“ ZEVrail Glasers Annalen, Jg. 145, Nr. 09, 2021
- [13] Spindler, M.; Lauer, M.: „High Accuracy Estimation of Velocity and Position for Railway Vehicles using Ferromagnetic Inhomogeneities,“ in 2018

- 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, HI, 2018, S. 1202–1207, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569919
- [14] Grewal, M. S.; Andrews, A. P.: „Applications of Kalman Filtering in Aerospace 1960 to the Present [Historical Perspectives],“ IEEE Control Syst., Jg. 30, Nr. 3, S. 69–78, 2010, doi: 10.1109/MCS.2010.936465
- [15] Särkkä, S.; Svensson, L.: Bayesian filtering and smoothing (Institute of Mathematical Statistics textbooks 17). New York: Cambridge University Press, 2023
- [16] Roth, M.; Baasch, B.; Havrila, P.; Groos, J. C.: „Map-Supported Positioning Enables In-Service Condition Monitoring of Railway Tracks,“ in International Conference on Information Fusion (FUSION), Cambridge, United Kingdom, 2018, S. 2346–2353, doi: 10.23919/ICIF.2018.8455377

Alle Autoren:
Deutsches Zentrum für
Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verkehrssystemtechnik,
Braunschweig



Dr. Michael Roth
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
m.roth@dlr.de



Dr. Judith Heusel
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
judith.heusel@dlr.de



Dr. Jörn Groos
Gruppenleiter
Asset Monitoring und Management
joern.groos@dlr.de



Dir ist wichtig, einen sicheren Betrieb zu gewährleisten?

**Wir suchen dich als erfahrene:n Planungsingenieur:in
zur Weiterentwicklung als Prüfsachverständige:n.**

Begleite unsere Projekte im Infrastrukturbereich
in den Gewerken:

- Leit- und Sicherungstechnik
- Elektrotechnik



Jetzt informieren und bewerben:
db.jobs/db-ec-abnahmepruefung

Was ist dir wichtig?

**Werde Teil der
DB Engineering &
Consulting**