

# Mobiles Labor RailDrIVE – synchrone Erfassung von Sensordaten

*Zeitreferenzierte Multisensoraufzeichnung des fahrzeughohen Umfeldes basierend auf einem modular konzipierten und flexibel einsetzbaren Zwei-Wege-Fahrzeug*



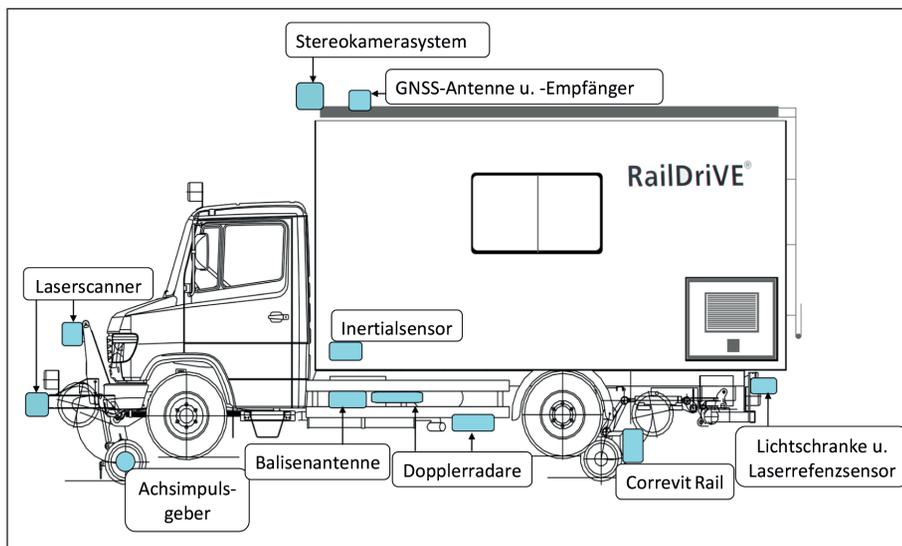
**Abb. 1:** RailDrIVE mit ausgefahrener Aushebe- und Drehvorrichtung zum Drehen und Auf- und Ausgleisen auf einem Bahnübergang

Katrin Lüddecke  
Andreas Kluge

Um kontinuierlich Informationen über den aktuellen Aufenthaltsort und Bewegungszustand eines Schienenfahrzeuges sowie über dessen Umfeld zu gewinnen, bietet es sich an, die dafür notwendige Sensorik auf dem Fahrzeug selbst zu installieren.

Mit dem RailDrIVE\* wurde ein mobiles Labor für die Erfassung verschiedener Sensordaten entwickelt. Es bietet die Möglichkeit, experimentelle Sensorik zum Test der Anwendbarkeit im Schienenverkehrsumfeld und zur Evaluation gegenüber etablierten strecken- und fahrzeugseitigen Messsystemen zu installieren. Dabei ist es beliebig er-

\* RailDrIVE ist ein eingetragenes Markenzeichen.



**Abb. 2:** Anordnung der permanent am RailDrIVE installierten Sensoren

weiterbar, da es keine Fokussierung auf nur ein Themengebiet gibt.

Als Zwei-Wege-Fahrzeug bietet das RailDrIVE den Vorteil, einen Großteil der Messfahrtvorbereitungen, wie die Installation und Inbetriebnahme zusätzlicher Sensoren, in einer gut ausgestatteten Werkstatt an einem beliebigen Ort durchführen zu können. Die Versuchs-Eisenbahnstrecken werden über die Straße erreicht, ohne sonst notwendige Schienen-Trassen zu belegen. Aufgrund seiner hydraulischen Aushebe- und Drehvorrichtung (Abb. 1) kann das RailDrIVE auch auf schmalen Bahnübergängen ein- und ausgeleitet sowie für eine Fahrtrichtungsumkehr an beliebigen Stellen gedreht werden. Damit ist es sehr flexibel einsetzbar und es können entsprechend der Versuchsfragestellungen spezielle Szenarien direkt angefahren werden.

## Sensoren

Zur sensorischen Grundausstattung des RailDrIVE zählen gemäß Abb. 2 die folgenden Komponenten:

Das RailDrIVE verfügt über Empfänger und Antennen zum Empfang von Signalen globaler Navigationssatellitensysteme (GNSS), im Speziellen das amerikanische Global Positioning System (GPS), das russische Glonass und das europäische System Galileo, das ab 2019 voll operabel sein soll.

Über ein GSM-Modem können die bodengebunden verbreiteten Ergänzungsdaten des Referenzdatendienstes ascos oder des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung Sapos empfangen und auf diese Weise die GNSS-Positionierungen korrigiert werden. Alternativ ist es möglich, über ein Funkmodem die Korrektursignale einer in Funkreichweite platzierten lokalen Referenzstation zu empfangen.

Zur Bestimmung der gefahrenen Geschwindigkeit und Ableitung der zurückgelegten Wegstrecke sind auf verschiedenen physikalischen Prinzipien basierende Sensoren am Fahrzeug montiert: Ein Achsimpulsgeber bestimmt die Anzahl der Radumdrehungen und mit Kenntnis des Radumfangs kann die gefahrene Strecke berechnet werden.

Für den Einsatz im Bahnbereich ausgelegte Radare unterschiedlicher Hersteller, teilweise mit Heizung, bestimmen durch Anwendung des Doppler-Effektes die Fahr-

zeugsgeschwindigkeit relativ zum Gleis in Fahrtrichtung.

Als weiterer berührungslos messender Geschwindigkeitssensor kommt ein Correvit-Rail-Sensor mit integriertem optischem Gitter zum Einsatz. Im Gegensatz zu den beiden erstgenannten Geschwindigkeitssensoren ist dieser Sensor bislang nicht im Bahnumfeld etabliert.

Als Referenzsystem für die Distanz- und Positionsmessungen der zuvor aufgeführten Sensoren sowie der Ergebnisse der Datenfusionsalgorithmen wird ein fotoelektrischer Lasersensor verwendet, der so ausgerichtet ist, dass er im Gleis verlegte Reflexionsstellen detektieren kann. Durch hochpräzises Einmessen der absoluten Positionen sowie der Distanzen zwischen den Reflexionsstellen kann das System als Referenz zur Bewertung der Ortungsinformationen der Einzelsensoren, aber auch von aus der Fusion verschiedener Sensordaten resultierenden Ortungsergebnissen verwendet werden.

Als weiteres Referenzsystem wird ein Tachymeter verwendet, das üblicherweise für die hochgenaue Landvermessung genutzt wird. Eine Balisenantenne, mit der Informationen von im Gleis verlegten Balisen ausgelesen werden können, liefert ebenfalls punktuell absolute Positionsinformationen.

Eine Inertialmesseinheit bestimmt die Drehraten und Beschleunigungen des Fahrzeuges um bzw. entlang der drei Raumachsen.

Zwei 1-Ebenen-Laserscanner ermöglichen jeweils die Erfassung der Konturen charakteristischer Elemente des Oberbaus und entlang der Strecke, wie z. B. Weichen und Bahnsteige. Jeder Scanner hat einen Scanbereich von 190°. Ein Laserscanner ist schräg nach vorn ausgerichtet, der zweite senkrecht nach unten, so dass auch Algorithmen für den Fall entwickelt werden können, dass der Scanner auf dem späteren Zielfahrzeug nicht an der Fahrzeugschleife montiert werden kann.

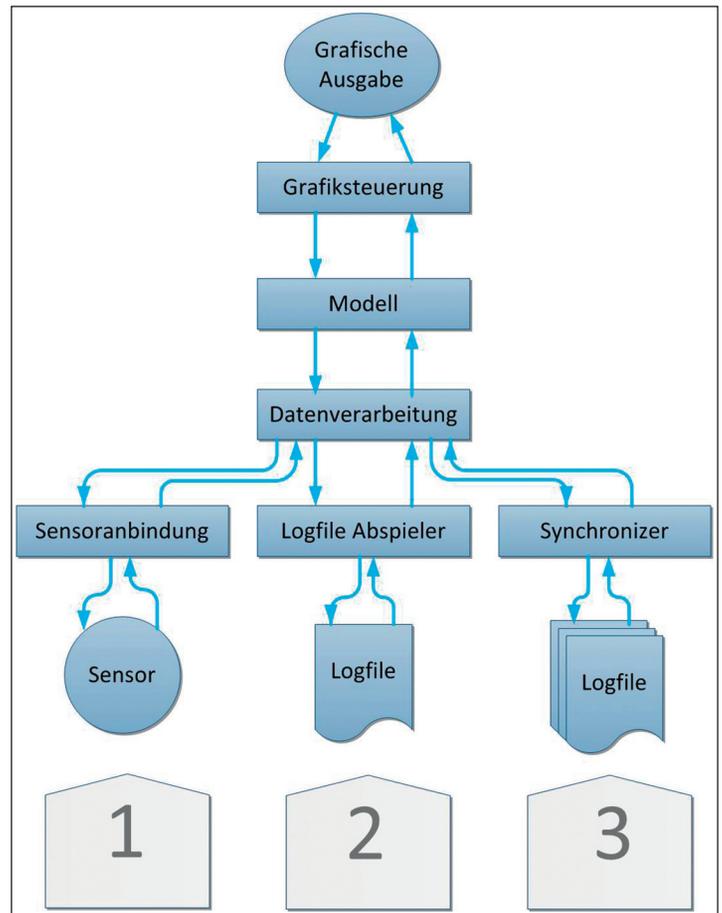
Zur optionalen Sensorausstattung des RailDriVEs zählt ein Stereo-Kamerasystem, das zum einen dazu dient, im Postprocessing die Daten der anderen Sensoren aufgrund der verbildlichten Umfeldbedingungen besser zu interpretieren. Zum anderen können mittels geeigneter Bildverarbeitungsalgorithmen ähnlich wie beim Laserscanner charakteristische Elemente des Gleisumfelds erkannt werden.

Sämtliche Sensoren werden möglichst so angeschlossen und verwendet, dass ein höchstmöglicher Deckungsgrad zur realen Anbindung in Schienenfahrzeugen erreicht wird. Somit wird die Voraussetzung für einen engen Bezug zur Wirklichkeit geschaffen.

### Zeitsynchrone Datenaufzeichnung und -wiedergabe

Die Vielfalt der verwendeten Sensoren und der unterschiedlichen Ausgaben bezogen auf die Inhalte macht es nötig, eine gemein-

**Abb. 3:** Generischer Aufbau einer Applikation (Schichtenmodell)



same Größe zu identifizieren, die für alle Sensoren im System gleich ist – die Zeit. Mittels eines hochwertigen Zeitserver wird kontinuierlich die unterbrechungsfreie lineare Fortschreibung der Zeit realisiert. Alle Komponenten auf dem Fahrzeug und außerhalb dessen bedienen sich dieser Zeit zur synchronen Aufzeichnung ihrer Daten und führen diese in einem Gesamtprotokoll zusammen.

Die Aufzeichnung erfolgt im Rohdatenformat, um auch für zukünftige Forschungsfragen unveränderte Aufzeichnungen bereitzuhalten.

Basierend auf diesem Gesamtprotokoll können erste Analysen stattfinden, die kausale Zusammenhänge für Ereignisse liefern, Vor- und Nachteile der Positionierung der Sensoren auf dem Fahrzeug aufdecken oder erste Hinweise geben, die die Grundlage für die Entwicklung von neuen Systemen für den Bahnverkehr darstellen.

Zur Softwarearchitektur des RailDriVE gehört neben den aufzeichnenden Komponenten ein Programm, welches in der Lage ist, alle aufgezeichneten Daten in annähernder Echtzeit am Büroarbeitsplatz abzuspielen. Das als „Synchronizer“ bezeichnete Programm bedient sich dabei der oben beschriebenen gemeinsamen Zeit, um im ersten Schritt eine Datenbank – das gemeinsame Protokoll – zu erzeugen und im zweiten

Schritt eine synchrone Abspielung der Fahrt im Büro zu realisieren.

Analysen und Programme, die ausgehend von den Sensorausgaben Mehrwerte generieren, wie z. B. eine multi-sensorische Weichenerkennung, können somit bereits in der Entwicklungsphase mit unter realistischen Bedingungen aufgezeichneten Daten versorgt werden. Neue Testfahrten finden somit nur statt, wenn besondere zu prüfende Situationen aufgezeichnet werden müssen. Dabei können mit dem Synchronizer nicht nur bestimmte Szenarien mittels verschiebbaren Anfangszeitpunkts ausgewählt werden, sondern auch Tests in Wiederholschleifen stattfinden. Mit Letzterem wird die Reproduzierbarkeit von Situationen und Lasttests der entwickelten Programme realisiert.

Die Bedienung ähnelt dabei sehr einem handelsüblichen Abspielgerät, wie einem DVD-Player.

Die Softwarearchitektur des RailDriVE erlaubt es ebenfalls, die Daten, die durch den Synchronizer wiedergegeben werden, an mehrere Programme zu spiegeln. So wird ein modularer Ansatz ermöglicht, indem unterschiedliche Programme verschiedene Mehrwerte generieren, deren Ergebnisse dann auch gegeneinander evaluiert werden können. Hauptansatz dabei ist, ein vollständiges Testsystem zu realisieren, welches sich

vom realen Betrieb nur dadurch unterscheidet, dass die Quelle der Daten austauschbar ist. Dieses Testsystem wird im folgenden Abschnitt detaillierter beschrieben.

## Testsystem

### Aufbau des Testsystems

Am Institut für Verkehrssystemtechnik (ITS) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde eine von Betriebssystem und Hardware unabhängige Testumgebung entwickelt.

Jedes Modul bzw. Programm innerhalb des Testsystems basiert auf einem eigens dafür entwickelten Schichtenmodell zur Trennung der komplexen Datenverarbeitung von der Implementierung der wissenschaftlichen Algorithmen sowie der Darstellung der Ergebnisse.

Dem Entwickler eines Algorithmus zur Nachprozessierung von Sensordaten werden ausschließlich die für den Algorithmus wichtigen Informationen in die für ihn relevante Schicht weitergeleitet.

Aktuellen Softwarekonzepten [1, 2] folgend, werden die Darstellung und die Verarbeitung der Daten strikt voneinander getrennt. Dies fördert die hohe Laufzeitperformance der einzelnen Applikationen. Wie in Abb. 3 ersichtlich, gliedert sich eine Applikation in vier Schichten:

- Datenquelle,
- Datenverarbeitung,
- Modell und
- Grafiksteuerung.

In der ersten Schicht treffen die Daten aus unterschiedlichen Quellen ein. So werden im realen Betrieb die Daten eines Sensors über die Sensoranbindung direkt in die höhere Schicht der Datenverarbeitung eingespeist. Als weitere Optionen kann ein aufgezeichneter Logfile direkt abgespielt oder alternativ auch über den schon beschrie-

benen Synchronizer bereitgestellt werden. Letzteres findet immer dann Anwendung, wenn mehrere aufgezeichnete Sensordaten im Verbund abzuspielen sind.

In der Schicht der Datenverarbeitung werden die eintreffenden Rohdaten Sensorherstellerabhängig interpretiert und die inhaltlichen Daten extrahiert, welche dann der oberen Schicht, dem Modell, zur Verfügung gestellt werden. Hier findet die Mehrwertgenerierung statt. Ist der Algorithmus durchlaufen, wird das Ergebnis der unteren Datenverarbeitung übergeben. Diese trägt jetzt auch die Verantwortung der Versendung der Daten an andere Komponenten im System. Auf der dem Modell übergeordneten Ebene, der grafischen Ausgabe, werden Ergebnisse weitergeleitet und dort direkt der Darstellung zugeführt.

Des Weiteren werden Datenaufzeichnungs- und Nachprozessierungsalgorithmen, sowie grafische Ausgaben auf einzelne Applikationen verteilt, um eine hohe Modularität der Testumgebung zu erzielen. Damit ergibt sich für die Testumgebung des RailDrIVE die in Abb. 4 dargestellte Systemansicht.

### Grundsätzliche Vorgehensweisen beim Testen

Im Bereich der Softwareentwicklung für Systeme, welche, basierend auf eintreffenden Daten aus multiplen Quellen, Analysen oder Mehrwerte generieren, wird oft auf systematisches Testen zurückgegriffen [3]. Die Tests der Software können dabei in drei grundsätzliche Kategorien unterteilt werden:

- zeitsynchrones Testen,
- zeitasynchrones Testen sowie
- modellbasiertes Testen.

Beim zeitsynchronen Testen spricht man vom Einsatz der zu erstellenden Software im Zielsystem zur Laufzeit bzw. im Betrieb. Dabei werden reale Szenarien und deren Daten

in die Zielapplikation gespeist, in der dann ein Mehrwert generiert werden soll.

Beim zeitasynchronen Testen werden reale Daten möglichst vieler unterschiedlicher Szenarien in sogenannten Testsessions aufgezeichnet. Diese Testsessions können später unter Laborbedingungen mehrfach wiedergegeben und die Daten direkt in den Softwareprototypen gespeist werden. Somit ist es möglich, die Software soweit zu optimieren, dass sie mit realitätsnahen Szenarien funktionsfähig wird.

Die dritte Möglichkeit, das modellbasierte Testen, beschreibt die Vorgehensweise, bei der das Verhalten aller Teilnehmer an dem Szenario basierend auf Softwaremodellen nachgebildet wird. So können auch nicht aufgezeichnete, aber realitätsnahe Szenarien simuliert werden. Der Softwareprototyp kann somit eine maximale Optimierung schon im Labor erlangen. Anzumerken ist hier allerdings, dass die Güte der Simulation bzw. abgebildeten Modelle direkt auf die Qualität des zu entwickelnden Softwareprototypen einwirkt.

### Testen mit dem RailDrIVE

Bei einer üblichen Testfahrt mit dem RailDrIVE wird vor der Fahrt ein textuelles Protokoll erstellt, in dem bereits Wunsch-szenarien der einzelnen wissenschaftlichen Mitarbeiter aufgenommen wurden. Dieses Protokoll in Verbindung mit einem Gleisplan ist die Grundlage für die Arbeit des Hauptbedieners des Testsystems im Innenraum des Fahrzeugs, welcher mit wenigen Mausclicks das System steuert. Der Arbeitsplatzbereich für die Bedienpersonen im Koffer des RailDrIVE wird in Abb. 5 gezeigt.

Gefahrene Szenarien werden mit Start- und Endzeitpunkt sowie Anmerkungen verzeichnet und liefern in Verbindung mit den aufgezeichneten Daten weitere nützliche Informationen für die Mitarbeiter im Büro.

Um einen geordneten Testablauf sicherzustellen, gehören zur Ausrüstung des RailDrIVE eine integrierte Sprechverbindung zwischen Hauptbediener und Fahrer sowie Funkgeräte zur Kommunikation mit Kollegen an der Teststrecke.

### Algorithmen

In den vergangenen Jahren entwickelte das ITS zahlreiche Algorithmen, die durch Auswertung der mit dem RailDrIVE erfassten Sensordaten für verschiedene Zwecke einen Mehrwert erzeugen. Eine Auswahl dieser Algorithmen wird hier vorgestellt:

Unter bestimmten Randbedingungen kann es sinnvoll sein, eine rein fahrzeugautarke Ortung eines Schienenfahrzeugs vorzunehmen, ohne streckenseitige Detektionselemente einzubeziehen [4]. Mit dem Ziel einer gleisgenauen fahrzeugautarken Ortung entwickelt das DLR Sensordatenfusionsalgorithmen. Neben der Fusion der

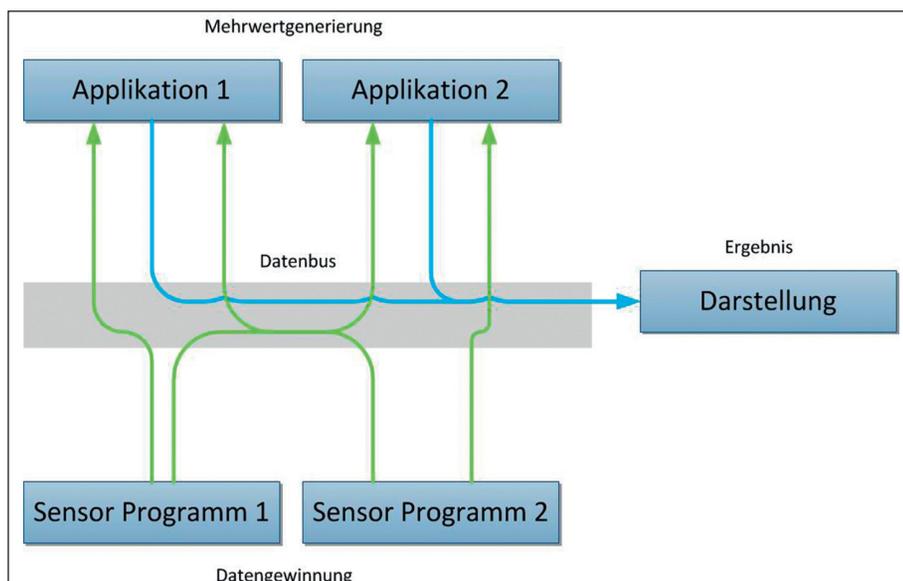


Abb. 4: Testsystem RailDrIVE

Daten mehrerer aktiver Sensoren (vgl. Kapitel Sensoren) kann durch ein sogenanntes Map-Matching auch ein Abgleich mit digitalen Streckenkarten durchgeführt werden. Damit ist eine streckenbezogene Positionsangabe in Form von Streckennummer, -kilometer, Richtungskennzahl und Gleis- bzw. Weichenbezeichnung möglich, wie sie im Bahnumfeld meistens benötigt wird.

Die fahrzeugseitige Detektion von Referenzpunkten im Fahrweg, deren Position genau bekannt ist, und deren Berücksichtigung innerhalb der Datenfusion kann dazu beitragen, das Ortungsergebnis in bestimmten Intervallen zu kalibrieren und damit insgesamt zu präzisieren.

Die Detektion charakteristischer Infrastrukturelemente lässt sich unter anderem durch geeignete Algorithmen auf Basis von bildgebenden Sensoren realisieren. Wir nutzen beispielsweise Laserscannerdaten zur Detektion von Weichen, Bahnübergängen und Führungsschienen [5]. Dazu werden die Daten tiefpassgefiltert und vom sensor-eigenen Koordinatensystem in das fahrzeugbezogene System überführt, bevor in der Datenanalyse spezielle Eigenschaften des jeweils zu identifizierenden Elements als Grundlage für die Filterung der Daten genutzt werden. Im Fall von zu detektierenden Weichen wird z.B. zuerst nach Schienenpaaren mit einem Abstand entsprechend der bekannten Spurweite gefiltert. Anschließend wird analysiert, ob sich im Bereich vor dem Fahrzeug zwei Gleise befinden, deren Gleismittelpunkte sich relativ zu einander entfernen oder nähern.

Die detektierten, georeferenzierten Infrastrukturelemente werden in einem Mapping-Prozess als Zusatzinformationen in bestehende digitale Karten abgelegt.

Die kontinuierliche Kenntnis der absoluten Position und Geschwindigkeit liefert die Grundlage für einen Algorithmus zur Bewegungsfortschreibung, aus dem hervorgeht, wo sich das Fahrzeug unter den getroffenen Annahmen zu einem bestimmten Zeitpunkt befinden könnte. Dabei sind insbesondere die extremen Fälle der maximal möglichen Beschleunigung und Verzögerung von Interesse, denn daraus ergeben sich für einen gegebenen Zeitpunkt der mindestens und der maximal zurückgelegte Weg. Im Fall von spitz befahrenen Weichen können mehrere Positionshypothesen entstehen.

Die Algorithmen zur fahrzeugautarken Ortung und zur Bewegungsfortschreibung finden z.B. Anwendung in einem am DLR entwickelten Prototypensystem zur Zugkollisionsvermeidung (railway collision avoidance system – RCAS). Es handelt sich dabei um ein Sicherheitsergänzungssystem. Bei einer Demonstrationsveranstaltung im Mai 2010 konnte gezeigt werden, wie ein Zug und das RailDrive ihre fahrzeugautark erzeugten Ortungsinformationen ohne Nutzung einer

**Abb. 5:** Arbeitsplätze im Koffer des RailDrive



landseitigen Kommunikationsinfrastruktur austauschten und auf Basis eines entsprechenden Algorithmus eine Kollisionswarnung ausgegeben wurde, sobald eine als kritisch bewertende Situation entstanden war. Das RailDrive wird auch genutzt, um im Rahmen des vom BMWi geförderten Projektes PiLoNav (Förderkennzeichen 19G10015A/B) eine hochpräzise und integrierte Ortungseinheit zu entwickeln. Deren Ausgaben bilden den Input für ebenfalls im Projekt prototypisch entwickelte neue Anwendungen im Bereich von Fahrerassistenzsystemen und einem operativen Verkehrsmanagement für eine netzweite Optimierung des Energieverbrauchs [6]. Ein neues Einsatzfeld des RailDrive ist die Detektion des Fahrwegzustands. Die aufgezeichneten Sensordaten werden zu diesem Zweck bezüglich ausgewählter Merkmale analysiert und daraus werden Prognosealgorithmen als Grundlage für eine zustandsorientierte Instandhaltung des Fahrweges abgeleitet.

### Ausblick

Das RailDrive wird kontinuierlich an die Anforderungen resultierend aus den verschiedenen Projekten angepasst. Aufgrund der modularen Hardware- und Softwarearchitektur ist eine Weiterentwicklung und Erweiterung sehr einfach realisierbar. Von besonderem Interesse ist derzeit die Integration weiterer Sensorik, die bislang noch nicht im Bahnkontext verwendet wird. Weitere Ziele sind die Erschließung neuer Themengebiete, wie z. B. Zustandsüberwachung in Tunneln und Untersuchung geologischer Aspekte im Hinblick auf Fahrwegstabilität, und die Identifizierung kostengünstiger alternativer Sensorsysteme für ausgewählte Anwendungsfälle sowie die Realisierung einer sicheren Kommunikation der Daten bzw. der daraus abgeleiteten Informationen.

### LITERATUR

- [1] Vlissides, J. M.; Coplien, J. O.; Kerth, N. L.: Pattern Languages of Program Design 2, Addison-Wesley, 1996  
 [2] Fowler, M.: Patterns of Enterprise Application Architecture, Addison-Wesley, 2002

- [3] Seidl, R.; Baumgartner, M.; Bucsecs, T.: Basiswissen Testautomatisierung - Konzepte, Methoden und Techniken, 1. Auflage, dpunkt.verlag, 2011  
 [4] Eickmann, C.; Gerlach, K.: Entwicklung eines fahrzeugseitigen Ortungssystems für den sicheren Bahnbetrieb, EI 08|2008  
 [5] Rahmig, C.; Johannes, L.; Lüddecke, K.: Detecting Track Events with a Laser Scanner for using within a Modified Multi-Hypothesis Based Map-Matching Algorithm for Train Positioning; European Navigation Conference, Wien, April 2013  
 [6] Lüddecke, K.; Rahmig, C.; Lemmer, K.: Hochgenaue und integrierte Ortung für den Schienenverkehr der Zukunft, EI 09|2012



Dip.-Ing. M.Sc. Katrin Lüddecke

Leiterin Gruppe „Sensoren – Daten – Algorithmen“ und Systemverantwortliche RailDrive DLR e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik (ITS), Abteilung Bahnsysteme, Braunschweig  
 katrin.lueddecke@dlr.de



Dipl.-Inf. (FH) Andreas Kluge

Softwarekonzeption und Architektur des Testsystems, stellv. Systemverantwortlicher RailDrive, DLR e.V. Institut für Verkehrssystemtechnik (ITS), Braunschweig  
 andreas.kluge@dlr.de

### Summary

#### RailDrive – a mobile laboratory for synchronous sensor data retrieval

The road-rail vehicle RailDrive of the German Aerospace Centre (DLR) is equipped with various positioning and navigation sensors with synchronous data recording ability. Data can be reproduced synchronously at any time. This is mainly used in the context of asynchronous testing of algorithms based on these data. The testing system is carried out as a layer model in order to ensure a clear separation between the data source, the complex data processing, the scientific algorithms and the presentation of the results. Examples of algorithms using the data are vehicle location, detection of infrastructure elements, forecast of movement update, prevention of train collisions as well as forecast of track conditions.