

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Technische Universität Dresden /
Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
genehmigt von DVV Media Group, 2019

Technologien und Verfahren des telematikbasierten Güterwagenmonitorings

Ein Beitrag zur Analyse von Möglichkeiten der sensorbasierten Zustandserfassung und Validierung von Technologien zur Wagenreihung an Eisenbahngüterwagen

HAGEN USSLER | OLIVER MICHLER

Um einen effizienteren und sichereren Schienengüterverkehr gewährleisten zu können, werden im Bereich des „Intelligenten Güterwagens“ mehr und mehr digitale Systeme zur Fahrzeugsystemdiagnose eingesetzt. Diese basieren auf der Erfassung von Fahr- und Betriebszuständen mittels Sensoren und der anschließenden Signalverarbeitung. Ergänzend zu vorausgegangenen Untersuchungen einer Flachstellen-, Rangierstoß- und Beladungsdetektion liegt der Fokus dieses Beitrags auf einem Funksystem zur Bestimmung der Güterwagenreihung auf Grundlage von Wireless Sensor Networks (WSN). Ausgehend von der Datenerfassung bis hin zur Informationsübertragung wird dabei eine Telematikplattform referenziert, die neben der Sensorik auch die notwendige Telematik zur Kommunikation und Eigenortung beinhaltet.

Schienengüterverkehr digital – der „Intelligente Güterwagen“

Im Kontext der fortschreitenden Digitalisierung und Automatisierung von Betriebs- und Instandhaltungsprozessen im Schienenverkehr konzentrieren sich die Forschungsarbeiten der TU Dresden, Professur für Informationstechnik für Verkehrssysteme (ITVS) der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, auf funk- und sensorgestützte Telematiklösungen mit Fokus auf den „Intelligenten Güterwagen“. Digitalisierung und Automatisierung von Anwendungen im Bahnsektor zielen dabei meist auf Prozesse ab, die sich auf die Verbesserung von Wirtschaftlichkeit, aber auch Sicherheit des Bahnbetriebs konzentrieren. Der Sachstandsbericht der Arbeitsgruppe Telematik und Sensorik des Technischen Innovationskreis Schienengüterverkehr (TIS) [1] mit Experten aus Forschung und Industrie hat mit der Zukunftsinitiative „5L“ Erfolgsfaktoren für einen wettbewerbsfähigen Eisenbahngüterwagen definiert. Ein Güterwagen soll demnach leise, leicht, laufstark, logistikfähig und life-cycle-cost-orientiert sein. Ziele und Aufgaben der Telematik können demzufolge neben der Verbesserung betrieblicher Prozesse die Unterstützung in der Instandhaltung, eine bessere Überwachung des Ladegutes, aber

auch Transportrouten- und Laufleistungserfassung sowie die Integration in Logistik- und Transportketten sein. Fahrzeugseitig sind die Ziele nur durch eine zuverlässige Informations- und Zustandserfassung am Güterwagen zu erreichen. Damit können beispielsweise sich anbahnende Aussetzungen von Güterwagen im Fahrbetrieb frühzeitig erkannt werden, die ursächlich etwa auf Flachstellen, Überladungen oder andere Unregelmäßigkeiten zurückzuführen sind. Diese können wiederum zu Entgleisungen führen und damit hohe Kosten verursachen.

Ein „Intelligenter Güterwagen“ zeichnet sich durch ein automatisiertes Fahrzeugmonitoring- und Fahrzeugdiagnosesystem aus. Dabei werden Funktionalitäten der Informations- und Zustandserfassung durch Sensorik am Güterwagen mit Telematikkomponenten für

die Ortung und Kommunikation vereint. Die technische Umsetzung des Gesamtkonzeptes wird mit einer Telematikplattform realisiert. Diese stellt den Informationsfluss sicher – von der Erfassung der verschiedenen Sensordaten und -signale am Güterwagen über deren algorithmische Verarbeitung, Analyse und Klassifikation bis zur Übertragung der Nutzinformation mit verschiedenen geeigneten Kommunikationstechnologien.

Die relevanten Informationen stehen dabei allen am Bahnbetrieb Beteiligten zur Verfügung. Dazu zählen Bahnkunden, Verkehrsunternehmen, Instandhalter sowie auch Netzbetreiber (Abb. 1).

Vor dem Hintergrund, dass der derzeitige Ausstattungsgrad der Güterwagen mit Sensorik relativ gering ist, wird ein großes wirtschaftliches Potenzial für den effizienten Güterwagenbe-

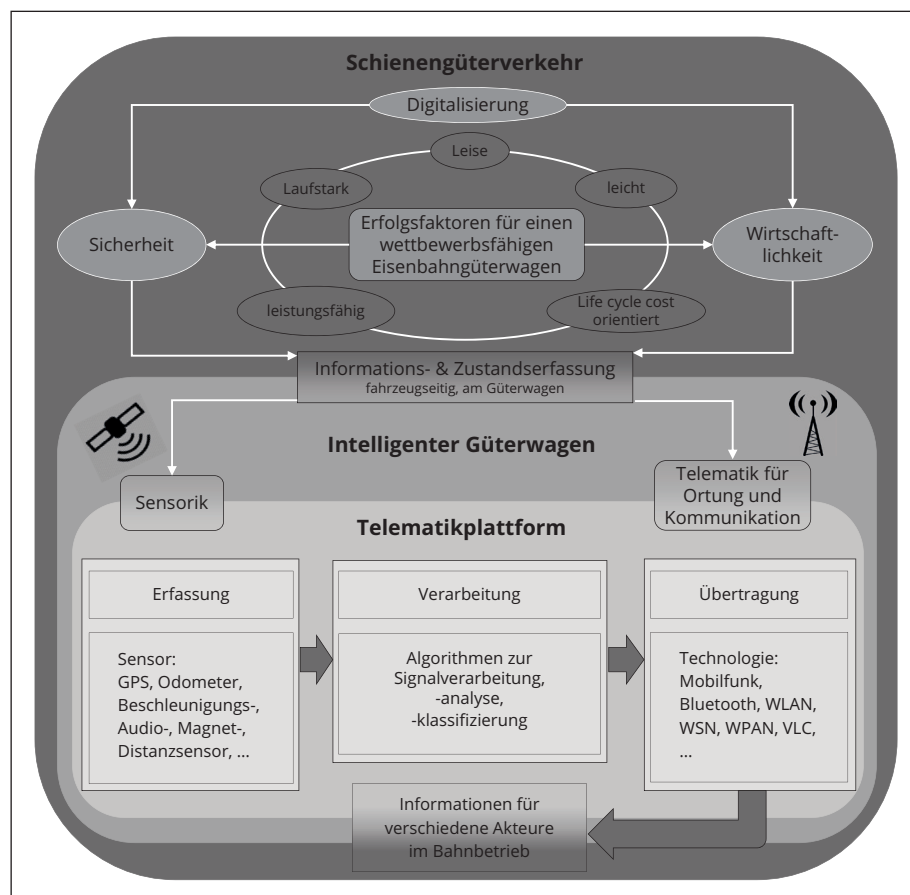


Abb. 1: Einordnung der Aufgaben einer Telematikplattform als Teil eines „Intelligenten Güterwagens“ im digitalen Schienengüterverkehr

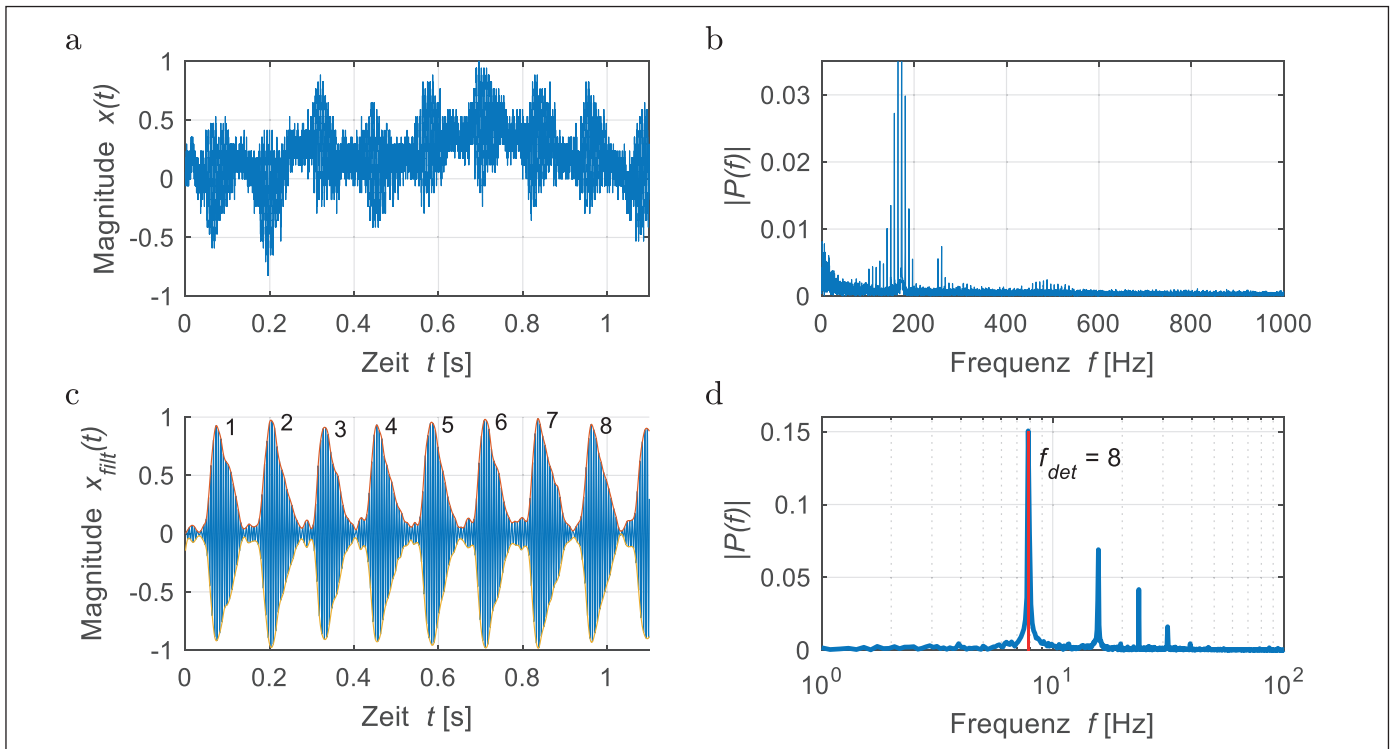


Abb. 2: Algorithmus der Flachstellenerkennung: a) Rohsignal, b) Frequenzspektrum des Rohsignals, c) bandpassgefiltertes Rohsignal, d) ermittelte Flachstellenfrequenz im Frequenzspektrum

trieb gesehen [2]. Nicht zuletzt ist die Zahl der Anbieter von Telematikkomponenten für den Güterwagen in den letzten Jahren stark gestiegen.

In der Praxis zu erfassende Zustände, Ereignisse und Informationen, die den Güterwagen betreffen, sind beispielsweise die Detektion von Flachstellen, Überladungen, Entgleisungen, Heißläufern oder zu starken Rangierstößen. Weiterhin ist die Ortung im Allgemeinen beziehungsweise die Erfassung der Laufleistung im Speziellen von Interesse. Möglichkeiten der Zugvollständigkeitsprüfung sowie der automatisierten Bremsprobe können durch den Einsatz spezieller Sensoren und Sensorsysteme realisiert werden.

Zustandserfassung mit ausgewählten Sensoren

Der Lehrstuhl ITVS untersucht in seinen Projekten Technologien auf Basis der beschriebenen Telematikplattform. Dabei wird vor allem der Forschungsansatz fokussiert, womit Technologien identifiziert und adaptiert sowie auf ihre praktische Anwendbarkeit hin untersucht werden. Kernthemen im Bereich des „Intelligenten Güterwagens“ sind dabei die Sensorik und Telematik.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projektes „Smart Rail Cargo“ (SRC) wurden an der TU Dresden verschiedene Sensoren zur Detektion von Flachstellen und Rangierstößen sowie der Beladungserkennung am Güterwagen untersucht und evaluiert. Die Ergebnisse der Feldtestmessungen werden nachfolgend

vorgelegt. Detaillierte Erläuterungen der zugrundeliegenden Auswertelgorithmen und Messprinzipien sind in [3] und [4] beschrieben.

Flachstellendetektion

Als Flachstelle wird eine unerwünschte Abnutzung am Güterwagenrad bezeichnet, die aufgrund von Gleitvorgängen zwischen Rad und Schiene bei stärkeren Bremsvorgängen und partiell niedrigeren Reibwerten entsteht. Dadurch können Schäden am Gleis (Schienebruch) und am Fahrzeug (Heißläufer, Feder-, Radsatzbruch) auftreten. Beschädigungen mit einer unzulässigen Länge von größer 60 mm [5] müssen daher detektiert werden, da Güterwagen andernfalls aus dem Betrieb auszusetzen sind [6].

Ein typisches Merkmal von Flachstellen sind akustisch wahrnehmbare Schlaggeräusche, die aus den Schwingungen der Schiene durch die mechanische Anregung des abgeflachten Rades resultieren. Diese Signale können über Luft- und Körperschall mit einem Mikrofon detektiert werden. Für die weiteren Untersuchungen zur Erkennung von Flachstellen wurde daher ein Audiosensor mit geringer Stromaufnahme ausgewählt. Die zugrundeliegende Signalverarbeitung basiert auf einem Hüllkurven-Algorithmus mit anschließender Frequenzanalyse der Audiosignale.

Die Evaluation des Audiosensors und Auswertelgorithmus erfolgte durch die Aufzeichnung des Audio- und Körperschalls eines generierten typischen Sägezahnsignals mit einer Signalwiederholungsrate von $f = 8$ Hz. Dies entspricht einer Fahrgeschwindigkeit von

ca. 80 km/h bei einem Raddurchmesser von 920 mm.

In Abb. 2 wird der Prozess der Signalanalyse grafisch dargestellt. Zunächst ist in 2a das veräuserte Audiorohsignal abgebildet. Mittels recheneffizienter Fast-Fourier-Transformation (FFT) lässt sich der für die Analyse relevante Frequenzbereich identifizieren (2b). Das Audiosignal, gefiltert mittels eines geeigneten angepassten Bandpassfilters, ist in 2c dargestellt. Die charakteristische Wiederholungsrate wird mittels FFT aus dem hier durch Wertequadratur energetisch aufbereiteten Signal ermittelt (2d). Die Untersuchungen unter Laborbedingungen zeigen, dass eine Detektion von Flachstellen am Güterwagenrad mit einfacher Audiosensorik prinzipiell möglich ist.

Beladungsdetektion

Um Überladungen von Güterwagen zu verhindern, wurden unterschiedliche Sensoren zur Erfassung und Klassifizierung des Beladungszustandes untersucht. Aufgrund der Robustheit und geringeren Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen sowie der geringen Baugröße der zu verwendenden Bauteile ist ein Magnetsensor für die Beladungsdetektion gewählt worden. Dieser misst die magnetische Flussdichte \vec{B} (Gesamtamplitude als auch deren Richtungsanteile in drei Raumachsen) eines gerichteten Permanentmagneten zwischen dem gefederten Drehgestellrahmen und dem ungefederten Radsatzlager (Abhebesicherung) eines Güterwagens, die sich in Abhängigkeit der Einfederung ändert (Abb. 3).

Die aufgezeichneten Werte einer Messung am Güterwagen mit simulierter Beladung (Einfederung \vec{s}_z) sind in Abb. 4a dargestellt. Weiterhin sind die linearen Approximationen der zuvor im Labor aufgezeichneten Messkurven gegeben. Diese werden als Referenz zur Bestimmung der Einfederung mit den ermittelten Messwerten verwendet. Um die Genauigkeit der Linearisierung zu bestimmen, werden die berechneten Einfederungen, $\vec{s}_{z, det. l}$ mit den tatsächlichen Einfederungen, $\vec{s}_{z, act. l}$ verglichen und in Abb. 4b dargestellt. Die geringfügigen und im Sinne der Problemstellung tolerierbaren Fehlerabweichungen (Variationsbereich: -2,9 mm bis +2,7 mm) resultieren aus der nichtlinearen Funktion der magnetischen Flussdichte und der relativ geringen Einfederung des Wagenkastens in Verbindung mit der hohen Messgeräteempfindlichkeit. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Klassifizierung des Beladungszustandes mit dem verwendeten Magnetsensor und dem Auswertalgorithmus möglich ist.

Rangierstoßdetektion

Die Detektion von Rangierstößen erfolgt mit dreiaxialen Beschleunigungssensoren in einem zweistufigen Verfahren. Zunächst werden die zusammengefassten Beschleunigungswerte mit dem in [7] definierten Schwellwert von $|a| \geq 5\vec{g}$ verglichen, Erfüllungswerte extrahiert und für diese die Aufprallenergie \vec{E} berechnet. Erreicht diese in einer definierten Zeit ebenso einen Schwellwert, so wird ein unerlaubter Rangierstoß detektiert.

Bei Feldversuchen wurden Rangierstöße mit zwei Fahrzeugtransportwagen durchgeführt, wobei einer der beiden auf einen stehenden Wagen abgestoßen wurde. Die algorithmische Auswertung der aufgezeichneten Werte ist für eine Aufprallgeschwindigkeit von 10 km/h in Abb. 5 dargestellt. Während Diagramm 5a den zeitlichen Verlauf der Be-

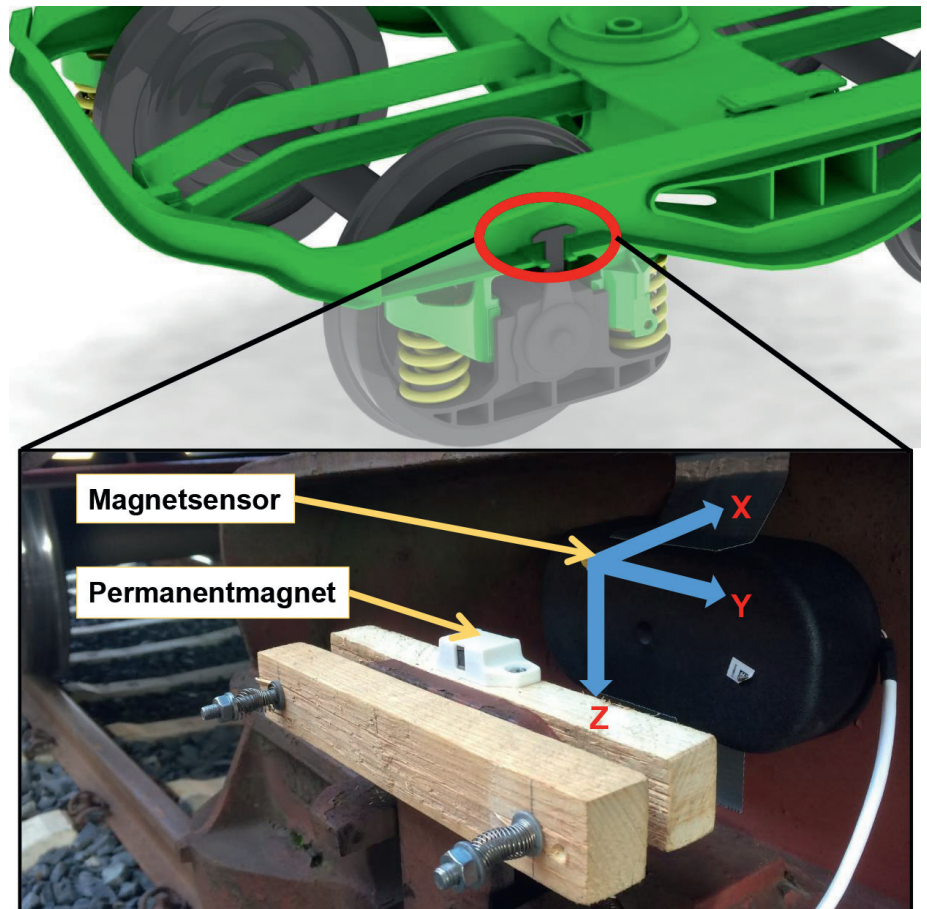


Abb. 3: Anbringung der Magnetsensorik am Güterwagen

schleunigungen in allen drei Raumachsen zeigt, wird in 5b die Stoßdetektion nach Überschreiten des Beschleunigungsschwellwertes dargestellt. Darüber hinaus wird die eingebrachte Energie äquivalent zum Beschleunigungsintegral berechnet. In 5c ist die Detektion eines unzulässigen Stoßes nach Erreichen eines bestimmten Energieschwellwertes binär angegeben.

Einsatz innovativer WSN-Technologien im Bahnverkehr

Innerhalb des Projektes SRC wurden neben den Untersuchungen der Einzelsensoren zur Zustandserfassung eines einzelnen Güterwagens auch Analysen zur funktechnischen Übermittlung der Sensordatensätze mit dem Entwurfsziel einer Telematikplattform mit Multisensorintegration durchgeführt.

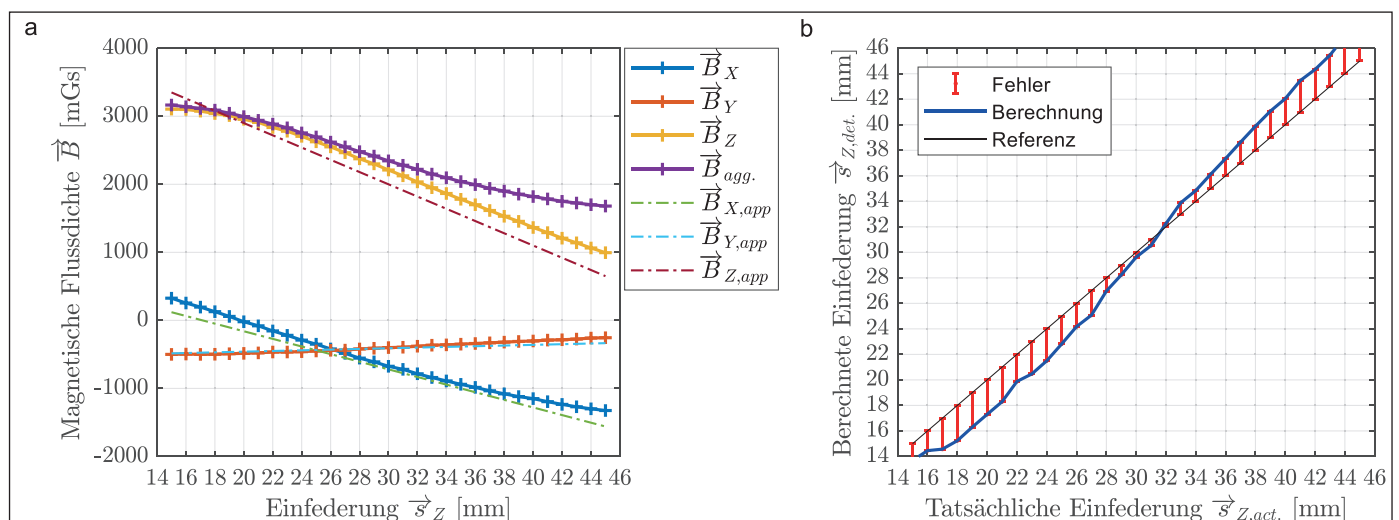


Abb. 4: Ergebnisse der Beladungsdetektion mit Magnetsensorik: a) gemessene und linearisierte magnetische Flussdichten bzgl. der Wagenkasteneinfederung, b) Vergleich von tatsächlicher und ermittelter Einfederung

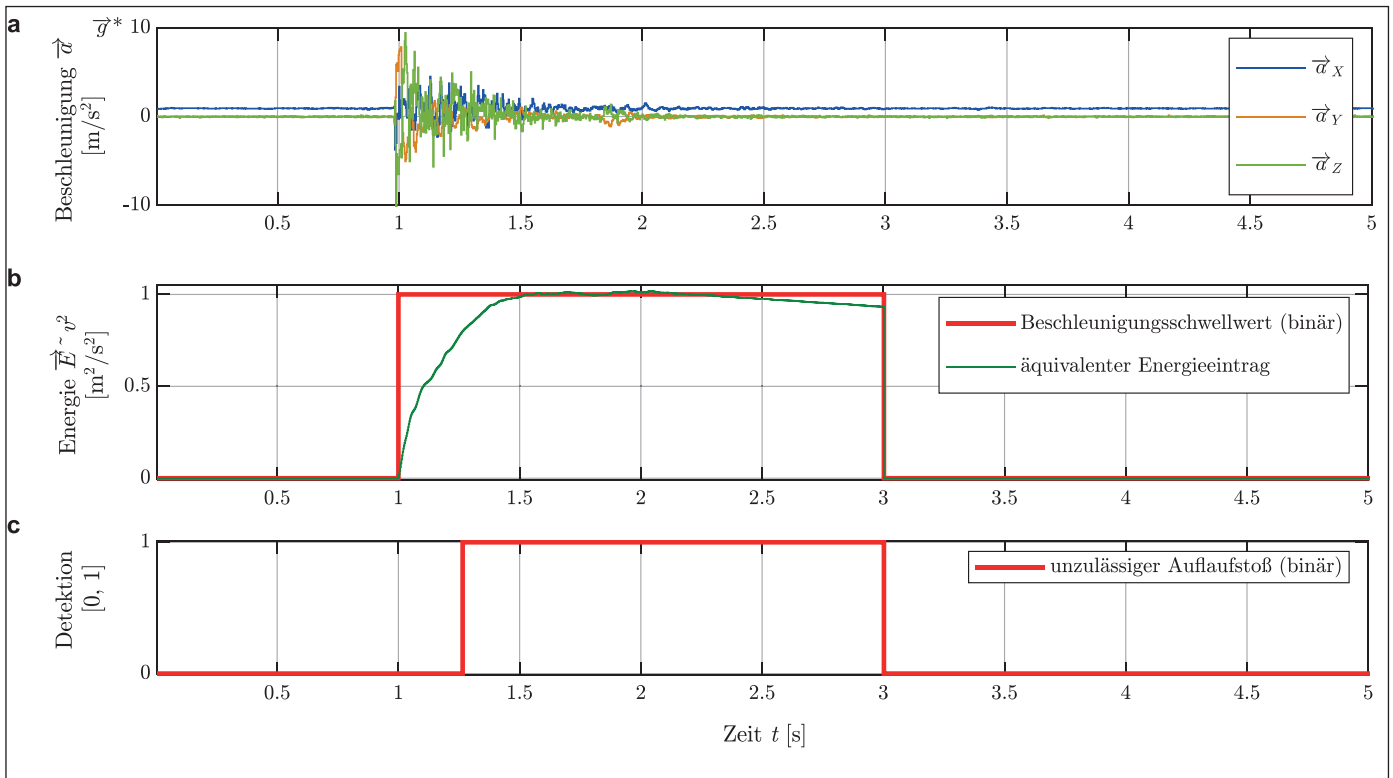


Abb. 5: Ergebnisse der Rangierstoßdetektion: a) gemessene Beschleunigungen, b) Detektion Rangierstoß und Energieintegral, c) Detektion unerlaubter Rangierstoß

Darauf aufbauend fokussierten sich die weiterführenden Untersuchungen nach Projektabschluss auf einen Sensor, der sowohl zur Datenkommunikation als auch zur Zustandserfassung eines gesamten Güterwagenzuges im Verbund genutzt werden kann. Dieses Multisensormodul eignet sich damit als ideale Ergänzung der zuvor beschriebenen Sensoren im Kontext des „Intelligenten Güterwagens“ mit erweitertem Funktionsumfang.

Für Güterwagenbetreiber ist aber auch die automatisierte Feststellung der Wagenreihung eines Zuges für die Disposition in Rangierbahnhöfen und die Zusammenstellung von Zugverbänden von besonderem Interesse. Um die Flexibilität der Güterwagenzusammenstellung zu gewährleisten, ist eine funkgestützte Ermittlung der Position der Güterwagen sowie der zugehörigen Informationsübertragung notwendig. Dafür können verschiedene Mess- und Kommunikationssysteme auf WSN-Basis eingesetzt bzw. softwaregestützt aufbereitet werden. Grundsätzlich wird die Position der Wagen relativ zu einem Referenzpunkt ermittelt. Die Übertragungssysteme müssen nun in der Lage sein, mindestens eine Distanz relativ zu diesem zu ermitteln. Eine Winkelberechnung zwischen den Kommunikationseinheiten kann darüber hinaus einerseits die Positionierungsgenauigkeit erhöhen und andererseits Aufschluss über deren geometrische Anordnung zueinander geben bzw. geometrische Mehrdeutigkeiten auflösen.

Diese Anforderungen können beispielsweise die nachfolgend betrachteten Systeme auf

Basis des Wireless Personal Area Networks (WPAN) Standards IEEE 802.15.4 erfüllen. Dabei werden die Signale vorzugsweise im 2,4 GHz ISM-Frequenzband (2400–2483 MHz) übertragen. Typisch lassen sich Distanzbeziehungen über Pegel- (RSSI), Laufzeit- (ToA) und Phasen- (PoA) Differenzen ermitteln. Dabei sind jedoch gerade in mehrwegintensiven Umgebungen die Ungenauigkeiten besonders stark ausgeprägt, weshalb robustere Analysemethoden wie folgt gefragt sind.

Die Ermittlung der Distanz, \vec{d} , zwischen den Kommunikationseinheiten erfolgt aus der Beobachtung von sogenannten I-Q-Samples. Diese beschreiben die Amplitude und Phasenlage empfangener Signale als komplexen Vektor. In diskreten Schritten werden eine Vielzahl von I-Q-Werten für verschiedene Frequenzen in zuvor definierten Frequenzschritten innerhalb der Bandbreite von 83 MHz aufgenommen, woraus eine spektrale Systemfunktion entsprechend der spektralen Leistungsdichte ableitbar ist. Diese wird mittels inverser FFT (IFFT) in den Zeitbereich überführt, wobei sich ein Äquivalent der Impulsantwort als charakteristische Peakfolge aus direktem sowie Reflexionspfaden ausprägt. An dessen erster aufsteigender Flanke wird nun eine Zeitdifferenz zur internen Referenzzeit des Empfängers ermittelt, woraus sich unter Beachtung der Lichtgeschwindigkeit die Distanz berechnen lässt. Um auf eine Zeitsynchronisation zwischen Sender und Empfänger verzichten zu können, wird ein Two-Way-Ranging durchgeführt. Die Kommunikation basiert dabei auf dem Initiator-

Reflektor-Prinzip. Ausgehend von der Kommunikationsanforderung des Initiators interagiert dieser mit dem Reflektor bezüglich Synchronisation, Kanalallokation, Distanzmessung und Datentransfer. Die Distanzberechnung findet im Initiator statt.

Für erste Untersuchungen der beschriebenen Technologie wurden dem Lehrstuhl ITVS ein WPAN-Sensordemokit der Firma Metirionic GmbH [8] zur Verfügung gestellt. Neben der Distanzermittlung erlauben die Module Winkelberechnungen und Datenkommunikation. Zunächst wurde die Hardware in Kooperation mit der Firma Metirionic laborseitig im reflexionsfreien Raum evaluiert, kalibriert und datenfilterungstechnisch optimiert. Im anschließenden Feldtest fanden Messungen an stationären Güterwagen statt, um die Eignungsfähigkeit und Systemgenauigkeit der verwendeten Module im Aufgabenbereich der Güterwagenreihung untersuchen zu können.

Im Rangierbahnhof befand sich der zur Verfügung stehende Schüttgutwagenzug auf gerader Strecke. Die Sensorkits wurden für jeden Einzelversuch nacheinander an jeweils einem der acht gekuppelten Waggons angebracht, wobei der Initiator stets am ersten Wagen verblieb. Die Fixierung erfolgte jeweils einseitig am Wagenzettelkasten (Abb. 6). Analysen zu allgemein geeigneten Anbringungsorten an Güterwagen unterschiedlicher Bauarten, auch unter Berücksichtigung des Lichtstrahlprofils, erfolgten in dieser generellen Machbarkeitsstudie nicht.

Güterwagen im Allgemeinen und Schüttgutwagen im Speziellen stellen besondere Anforderungen an das drahtlose Übertragungssystem. Durch die massiven großflächigen Metallumgebungen ist eine herausfordernde Funkumgebung gegeben. Diese charakterisiert sich durch Signalabschattungen, Reflexionen und andere Signalausbreitungsphänomene, wodurch die Messergebnisse negativ beeinflusst werden können. Die Aufnahme der Messwerte erfolgte mittels der herstellerseitigen Terminalprogrammierung, wobei für jeden Messpunkt ca. 900 Einzeldistanzen mit 3 Hz Messfrequenz aufgezeichnet wurden. Aufgrund unterschiedlicher Schüttgutwagenbauarten konnten beispielsweise Funkverbindungen realisiert werden, bei denen keine direkten Sichtverbindungen zwischen den zwei kommunizierenden Sensoren bestanden („non line of sight“ – NLOS). In den anderen Konstellationen waren hingegen „line of sight“ (LOS)-Verbindungen vorhanden. Eine Darstellung der Versuchsdurchführung und -auswertung ist in Abb. 7 dargestellt.

Mit den vorhandenen Sensorkits und dem der Messung zugrunde liegenden IFFT-Algorithmus wurde bis zu einer Distanz von $\bar{d} = 96 \text{ m}$ gemessen. Der Distanzfehler, $\Delta \bar{d}$, im Bezug zur Referenzdistanz liegt über alle Messpunkte bei unter 1,5 m. Im Bereich der LOS-Verbindungen ist diese deutlich geringer bei ca. 0,6 m (Wagen 2 und 3). Für die NLOS-Verbindungen wurde eine Genauigkeit von durchschnittlich unter 1,8 m gemessen. Die Streuungen der aufgenommenen Messwerte unter diesen Bedingungen sind ebenfalls größer.

Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass eine hinreichend exakte Distanzbestimmung zwischen den einzelnen bis zu 15,10 m langen Güterwagen und damit eine



Abb. 6: Messungen mit WSN-Knoten am Güterwagenzug

automatische Feststellung und Kontrolle der Wagenreihung aus technischer Sicht möglich ist. Distanzungenauigkeiten sind dabei u.a. auf Mehrwege- und Abschattungseffekte (NLOS) zurückzuführen. Signalreflexionen waren dabei vor allem im Bereich der letzten drei Güterwagen zu erwarten, bei denen sich auf gegenüberliegenden Gleisen ebenfalls Schüttgutwagen befanden.

Herausforderungen bei der Umsetzung einer Telematikplattform

Zukünftig ist neben der Verbesserung der Distanzgenauigkeiten durch Sensorkalibrationen auch die vertiefte Untersuchung und Optimierung der in den Modulen bereits umgesetzten Winkelbestimmung zwischen den Funksensoren vorgesehen. Damit ist auch der

Einsatz eines solchen Systems zur Feststellung der Zugintegrität denkbar. Dafür werden eine permanente Distanz- und Winkelmessung zur Lokalisierung von einzelnen Güterwagen relativ zueinander sowie eine kontinuierliche Datenübertragung während der Zugfahrt benötigt. Mit der direkten Kommunikation mehrerer Sensoreinheiten können Informationen theoretisch auch über mehrere hundert Meter weitergeleitet werden. Die Funktionalitäten dieses Systems sind damit ergänzend zu den zuvor vorgestellten Sensoren in eine Telematikplattform integrierbar.

Zur Verbesserung von Systemkompatibilitäten widmen sich derzeitige Forschungsbemühungen im Bereich der funkbasierten Kommunikation den Möglichkeiten der Distanz- und Winkelbestimmung mit dem Funkstandard

Vermessung
Geotechnik
Geoinformatik
Entwicklung

 **intermetric**
Das richtige Maß

BEVOR DIE BAHN KOMMT ...

... kommt beim Gleisbau die Geometrie. Jede Schwelle, jede Weiche, jede Brücke, jeder Tunnel müssen präzise eingemessen und gebaut werden. Mit dem richtigen Maß wird alles gut.

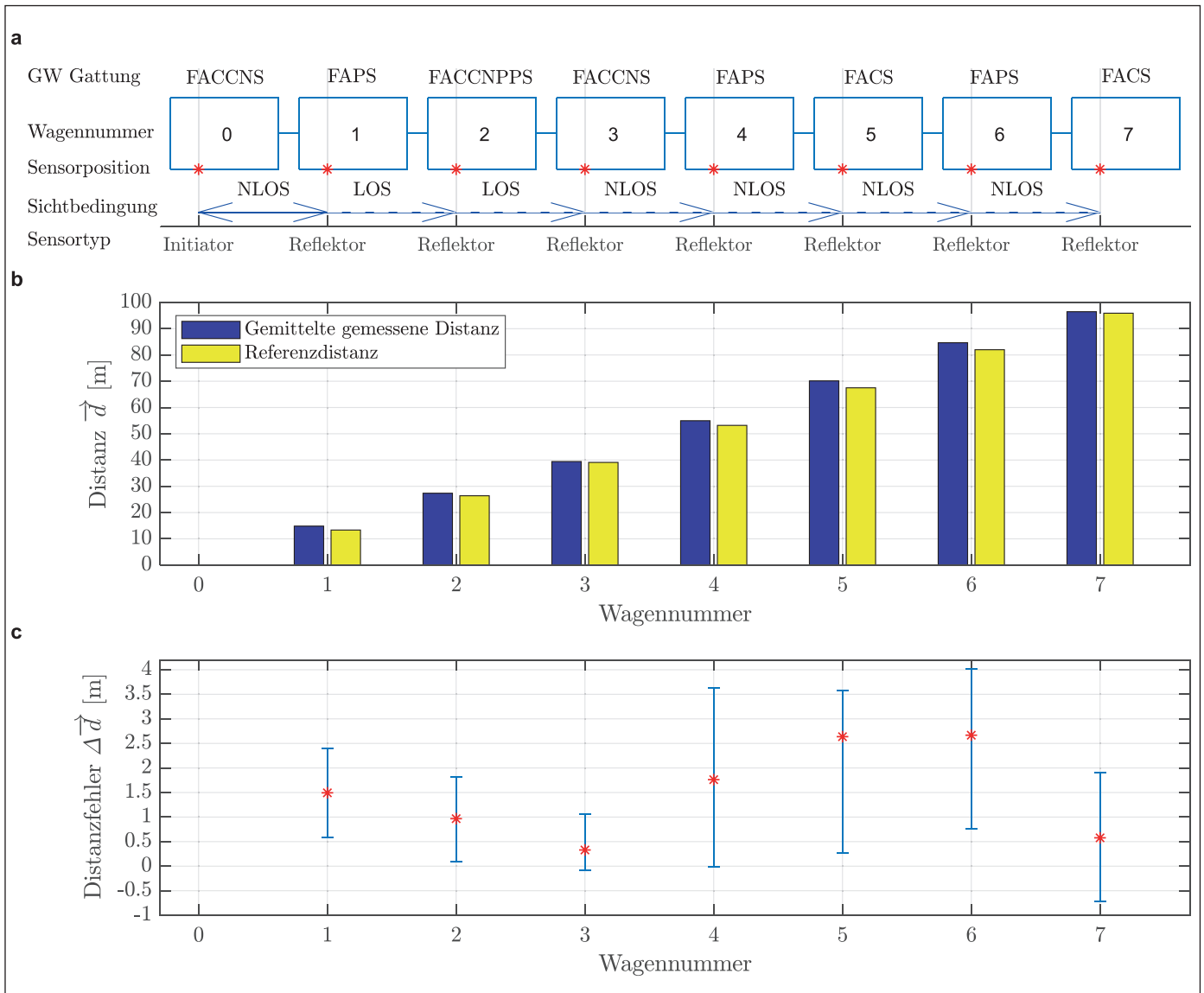


Abb. 7: Ergebnisse der Distanzmessungen: a) prinzipielle Versuchsskizze, b) gemessene Distanzen und Referenzdistanzen, c) Distanzfehler und Messwertstreuungen

Bluetooth-LE (Low Energy). Neben der besseren Energieeffizienz ist hier auch die Anzahl potenzieller Endgeräte größer.

An Sensoren und Telematik werden im Bahnbereich hohe Anforderungen gestellt. Diese sollen z.B. robust gegenüber Umwelteinflüssen und hohen Beschleunigungen sein. Weiterhin werden eine hohe Energieeffizienz und autarker Betrieb gefordert, was mit Möglichkeiten des Energy Harvesting realisiert werden könnte. Auch wirtschaftliche Faktoren wie die Skalierbarkeit, der Preis und große Instandhaltungsperioden sowie die Anbindung an das Backend müssen bei der Entwicklung einer Telematikplattform beachtet werden. ■

Acknowledgement

Wir danken den Firmen Captrain Deutschland, Bahnkonzept Deutschland und Metirionic für die Unterstützung bei den WSN-Feldtests sowie bei der Erfassung der Messdaten.

QUELLEN

- [1] Deuter, M.; Heyder, B.; Hubach, K.; Loske, F.; Michler, O.; Morrocu, M.; Obrenovic, M.; Strassmann, P.; Thomas, M.; Troeger, L.: Sachstandsbericht Arbeitsgruppe Telematik und Sensorik des Technischen Innovationskreis Schienengüterverkehr (TIS), Revision 3.9 2014
- [2] König, R.; Hecht, M.: Weissbuch Innovativer Eisenbahngüterwagen 2030, 1. Auflage, Dresden 2012
- [3] Ußler, H.; Benabdellah, K.; Michler, O.; Löffler, G.: Sensoreinsatz im Intelligenen Güterwagen, ZEVrail Glasers Annalen 142 (2018) 8, S. 282-289, ISSN 1618-8330
- [4] Ußler, H.; Michler, O.; Löffler, G.: Validation of multiple sensor systems based on a telematics platform for intelligent freight wagons, Proceedings of the 21st EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2018, 17th-19th September 2018, Braunschweig, Germany; Transportation Research Procedia Volume 37, 2019, pp. 187-194, ISSN 2352-1465

- [5] DIN EN 15313: Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsatzinstandhaltung, Beuth Verlag GmbH, Berlin September 2016
- [6] GCU Bureau sprl.: Allgemeiner Vertrag für die Verwendung von Güterwagen (AVV), Ausgabe vom 1. Januar 2019
https://www.gcubureau.org/documents/10184/82072/20190101_GCU_FULL_DE.pdf/4678702c-913f-4f65-9002-ea649c19e780, 11.02.2019 um 17:23
- [7] DIN EN 12663-1: Bahnanwendungen – Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen, Beuth Verlag GmbH, Berlin März 2015
- [8] https://www.metirionic.com/en/products/demo_kits/demo-kit-mic-dmk-215.html, 08.02.2019 um 9:50



Dipl.-Ing. Hagen Ußler

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Informationstechnik für Verkehrssysteme der Technischen Universität Dresden
hagen.ussler@tu-dresden.de



Prof. Dr.-Ing. Oliver Michler

Inhaber der Professur für Informationstechnik für Verkehrssysteme an der Technischen Universität Dresden
oliver.michler@tu-dresden.de