



Der Schlüssel zur Bahn der Zukunft: Lokalisierung und drahtlose Kommunikation

Gastbeitrag von Paul Unterhuber

Die Bahn der Zukunft ist digital und stützt sich auf fahrzeugseitige Systeme. In dieser digitalen Zukunft sind Lokalisierung und drahtlose Kommunikation die Schlüssel für einen automatisierten und perspektivisch autonomen Bahnbetrieb. Ein neues Kommunikationssystem zur kombinierten Datenübertragung und Distanzschätzung wurde entwickelt und in realen Eisenbahnumgebungen getestet. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial solcher Systeme und können als Proof of Concept angesehen werden.

Die europäische Bahn steht unter massivem Veränderungsdruck. Bereichsweise überalterte Infrastrukturen und fehlende Systemrobustheit führen zu Unpünktlichkeit und sinkender Verlässlichkeit, und das in einer Zeit, in der das Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr deutlich steigen soll. Die politischen und gesellschaftlichen Erwartungen sind klar: mehr Zuverlässigkeit, mehr Kapazität, mehr Nachhaltigkeit, mehr transeuropäischer Schienenverkehr. Digitale Technologien sind dabei nicht nur Enabler, sondern strategische Hebel für Effizienz und Flexibilität. Besonders fahrzeugseitige Systeme rücken in den Fokus. Sie

bilden den Schlüssel für den automatisierten und perspektivisch autonomen Bahnbetrieb: präzise Lokalisierung und drahtlose Kommunikation.

Lokalisierung

Die Fähigkeit, einen Zug sicher und genau zu lokalisieren, ist eine Schlüsselkompetenz für die zukünftige Automation des Bahnbetriebes. Um geringe Abstände zwischen Zügen zu erlauben, beispielsweise für Moving Block oder VCTS (siehe Kasten), oder für automatisierten Fahrbetrieb, Automatic Train Operation (ATO), mit hohem Automatisierungsgrad, Grade of Automation (GoA), zu ermöglichen, muss die absolute Lokalisierung umso genauer bestimmt werden können. Dafür wird an einem neuartigen System zur absoluten und sicheren Zuglokalisierung, Advanced Safe Train Positioning (ASTP), gearbeitet. Um die hohe Genauigkeit, aber auch die Sicherheitsanforderungen zu erfüllen, wird eine Fusion von Satellitennavigation mit zugseitigen Sensoren und digitalen Karten vorangetrieben. Damit können Züge ihre absolute Position bestimmen und per drahtloser Kommunikation an die Leitstelle weitergeben.

Der Austausch von ASTP-Information zwischen Zügen kann zur kooperativen relativen Lokalisierung, also der Abstandsbestimmung zwischen Zügen, verwendet werden. Diese Abstandsbestimmung wie in Abbildung 1 dargestellt, kann zur Kollisionswarnung eingesetzt werden oder ermög-

licht das Fahren im relativen Bremsabstand. Aber die Ungenauigkeit der einzelnen ASTP-Informationen summieren sich und erhöhen die Ungenauigkeit der resultierenden Abstandsbestimmung.

Eine von ASTP unabhängige Bestimmung des Abstandes kann mittels funkbasierter Distanzschätzung erfolgen. Vor allem im Nahbereich von wenigen Metern bis mehreren hundert Metern kann eine Genauigkeit der Abstandsbestimmung im Dezimeterbereich erreicht werden.

Drahtlose Kommunikation

Die Evolution hin zu drahtlosen Systemen hält auch im Eisenbahnumfeld Einzug. In Europa wird die Ablösung von Global System for Mobile Communications – Railway (GSM-R) durch das Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) für Zug-zu-Infrastruktur-, Train-to-Ground (T2G), Kommunikation vorangetrieben. Die Kommunikation im Zug soll mit kabellosen Systemen ergänzt werden. Das europäische System Infrastructure for Resi-

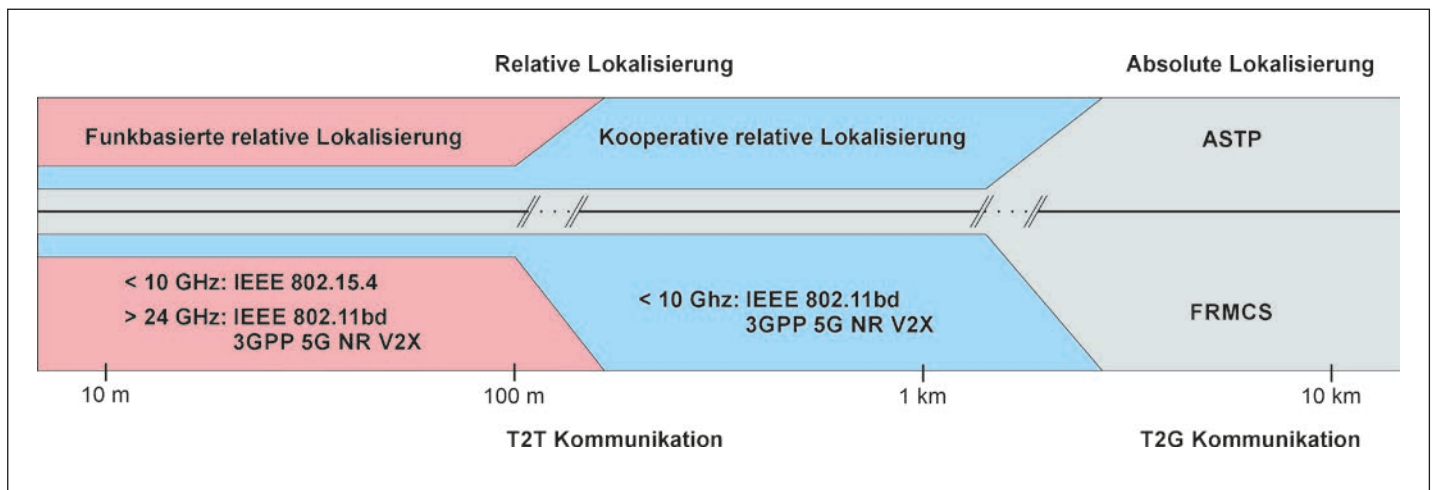


Abbildung 1: Innovativer Ansatz der komplementären Lokalisierung und redundanter Kommunikation in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Zügen.

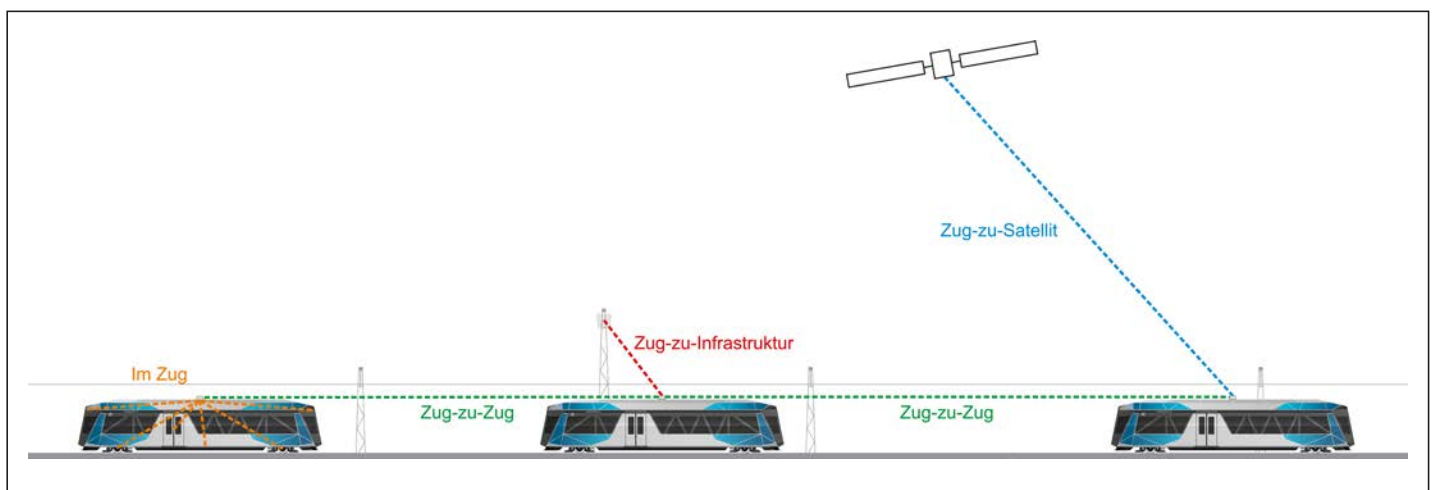


Abbildung 2: Drahtlose Kommunikation im Eisenbereich.



Abbildung 3: VCTS-Showcase mit T2T-Kommunikationssystem.

lience, Interconnectivity and Security by Satellite (IRIS²) soll Kommunikation vom Zug-zu-Satellit, Train-to-Satellite (T2S), im Rahmen von FRMCS ermöglichen. Darüber hinaus wird die direkte Kommunikation von Zug-zu-Zug, Train-to-Train (T2T), entwickelt um die dezentrale Vernetzung von Zügen bei unterschiedlichen Distanzen zu ermöglichen (siehe Abbildung 1).

Abbildung 2 zeigt das Zusammenspiel dieser Kommunikationssysteme. Bei Ausfall einzelner Kommunikationspfade wie zum Beispiel bei T2G-Abdeckungsproblemen oder T2S-Abschattung in Tunneln, können Datenströme umgeleitet, kann der Betrieb aufrechterhalten und damit die Resilienz des gesamten Netzwerks gestärkt werden. Daher ist die drahtlose Kommunikation zwischen Zügen eine Schlüsseltechnologie für den zukünftigen Bahnbetrieb. Sie ermöglicht Kollisionswarnungen durch frühzeitigen Informationsaustausch, ist zentral für die Koordination von Folgezügen, etwa im Rahmen von Moving Block oder VCTS, und ermöglicht den hochautomatisierten, fahrerlosen Bahnbetrieb (ATO GoA4). Technisch zeichnet sich T2T-Kommunikation durch eine besonders geringe Latenz und hohe Zuverlässigkeit aus. Die Übertragungsrate ist variabel und hängt vom verwendeten Kommunikationsstandard sowie der Distanz zwischen den Zügen ab, wie in Abbildung 1 dargestellt. Ein weiterer zentraler Aspekt ist die sehr hohe Störsicherheit, insbesondere im Hinblick auf Cyber-Security, die Manipulationen und unautorisierte Zugriffe zuverlässig unterbindet. Funktional bietet die Technologie weit mehr als reine

Datenübertragung. Sie ermöglicht funkbasierte relative Lokalisierung, die als zusätzlicher Sensor die Odometrie unterstützen und die Positionsgenauigkeit innerhalb eines Zugverbunds erhöhen kann.

Kombination aus Daten und Distanz

Das Institut für Kommunikation und Navigation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelte und testete ein drahtloses Kommunikationssystem für Datenübertragung und funkbasierter relativer Lokalisierung für Eisenbahnanwendungen im Rahmen des FP2-R2DATO.

Die entwickelten und implementierten Algorithmen zur Distanzschätzung beruhen auf Messungen der Paketumlaufzeit, Round Trip Time (RTT), zwischen den Kommunikationseinheiten. Dazu werden Pakete im Physical Layer des Übertragungssystems, also in der letzten Stufe vor der Abstrahlung des Signals, mit einem Zeitstempel versehen und versendet. Durch das mehrmalige Vor- und Zurücksenden von zeitgestempelten Paketen und dem damit verbundenen Austausch der Information der Sende- und Empfangszeitpunkte kann die Distanz zwischen den Kommunikationseinheiten bestimmt werden. Die Genauigkeit der Interpretation des Signals und damit die Ermittlung des Empfangszeitpunktes ist bandbreitenabhängig. Je genauer das Setzen des Zeitstempels passiert und je höher die verfügbare Bandbreite ist, desto genauer kann die Distanz bestimmt werden.

Daher wurde ein System für dezentrale direkte Kommunikation mit sehr hohen Bandbreiten entwickelt und die Algorithmik zur Distanzschätzung implementiert. Die angestrebte Reichweite des Systems wurde auf 250 Meter begrenzt und entspricht damit dem in Abbildung 1 rot markierten Bereich. Das Testsystem basiert auf dem Funkstandard IEEE 802.15.4 und unterstützt eine Bandbreite von 500 MHz in Frequenzbändern zwischen 3 GHz und 10 GHz. Die Algorithmen können auch auf andere Funkstandards für direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen wie zum Beispiel 3GPP 5G NR V2X oder IEEE 802.11 bd NGV übertragen werden. Diese Funkstandards bieten 10–40 MHz Bandbreite für Frequenzbänder unter 10 GHz oder 50–400 MHz bei Nutzung von Frequenzbändern über 24 GHz.

Test mit zwei Regionalzügen

Die Tests fanden im Rahmen des Projektes FP2-R2DATO in einem abgesperrten Gelände der Niederländischen Staatsbahn „Nederlandse Spoorwegen“ (NS) in Amersfoort, Niederlande, statt. Auf einer Strecke von circa 350 Metern fuhren zwei mit dem neuen Kommunikationssystem ausge-

rüstete NS Regionalzüge des Typs CAF SNG rund 100 mal auf und ab. Die Züge wurden von erfahrenen Triebwagenführern von NS gesteuert. Wie in Abbildung 3 gezeigt befand sich das Kommunikationssystem in zwei kompakten Boxen, die am ersten Tag auf den Scharfenbergkupplungen beider Züge und am zweiten Tag auf der Kupplung eines Zuges und auf einem Prellbock befestigt waren.

Mit diesem Setup konnte das Verhalten der Kommunikation und der relativen Lokalisierung in folgenden Szenarien untersucht werden. Erstens, Züge, die virtuell gekoppelt fahren. Hierbei wurden Abstände bis auf 15 Meter zwischen fahrenden Zügen am gleichen Gleis realisiert. Zweitens, virtuell gekoppelte Zugteile, die in einen Bahnhof auf zwei parallelen Gleisen einfahren. Und drittens, Züge, die sich anderen Zügen oder Prellböcken annähern. Insgesamt wurden in zwei Tagen elf unterschiedliche Tests und ein VCTS Showcase durchgeführt.

Die erhobenen Daten dienen der Validierung des Kommunikationsverhaltens und der Genauigkeit der radiobasierenden relativen Lokalisierung und werden in Berichten des FP2-R2DATO sowie in wissenschaftlichen Publikationen 2026 veröffentlicht. Die Beobachtungen vor Ort und erste Ergebnisse der Auswertungen führen zu folgenden Erkenntnissen: Ein kontinuierlicher Datenaustausch zwischen Zügen mittels Breitbandkommunikation konnte bis zu einer Reichweite von 300 Metern hergestellt werden. Die getestete maximale Reichweite wurde durch die Länge der Teststrecke begrenzt und nicht durch das getestete Kommunikationssystem. Die implementierten Algorithmen zur funkbasierten relativen Lokalisierung konnten erfolgreich getestet und die Distanz zwischen den Zügen konnte in Echtzeit ermittelt werden.

Es wurden unterschiedliche Einflüsse der Eisenbahnumgebung und der Züge auf die Kommunikation und Distanzschätzung beobachtet. In engen Kurven können Objekte entlang der Strecke und bei Fahrten auf parallelen Gleisen die Züge selbst die Kommunikation abschatten. In beiden Fällen werden die Verfügbarkeit der Kommunikation und die Genauigkeit der Distanzschätzung beeinträchtigt. Mit diesen Erkenntnissen können Aussagen zur Integration von Kommunikationssystemen in die Zugstruktur getroffen werden.

Für den VCTS Showcase mit zwei im engen Abstand fahrenden Zügen wurde den Triebwagenführern die Abstandsinformation in Echtzeit zur Verfügung gestellt. Damit konnte erstmalig eine Assistenzfunktion für die genaue Abstandssteuerung basierend auf T2T-Kommunikation getestet werden und wurde sehr positiv von den Triebwagenführern angenommen.

Die Testergebnisse können als Proof of Concept angese-

Was ist VCTS?

Virtually Coupled Train Sets (VCTS) ist ein innovatives Konzept zur Kapazitäts- und Flexibilitätserhöhung im Eisenbahnbetrieb.

Fahrzeuge sind nicht mit mechanischen und elektrischen Kupplungen, sondern durch eine drahtlose Kupplung verbunden. Dies vermeidet mechanische Probleme, reduziert die Zeit für Kuppelvorgänge und ermöglicht dynamisches Kuppeln und Entkuppeln während der Fahrt.

hen werden und zeigen klar das Potenzial solcher Systeme im Eisenbahnbereich. Systeme mit kombinierten Fähigkeiten der Kommunikation und Lokalisierung werden Bahnanwendungen wie Moving Block und VCTS ermöglichen und damit die Effizienz und Flexibilität des System Bahn maßgeblich erhöhen. ==

Dr.-Ing. Paul Unterhuber ist Researcher am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Ein Video zum Thema findet sich hier: <https://www.youtube.com/watch?v=T424LpuiC9U>



Co-Finanziert von der Europäischen Union.



Finanziert von der Europäischen Union. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die des Autors und spiegeln nicht unbedingt die der Europäischen Union wider. Weder die Europäische Union noch die Bewilligungsbehörde können für diese verantwortlich gemacht werden. Das Projekt FP2-R2DATO wird von dem Europe's Rail Joint Undertaking und seinen Mitgliedern unterstützt.