

# Tagungsband

## Scientific Railway Signalling Symposium 2021

Abweichungen vom Regelbetrieb – Bleiben  
Kapazität, Qualität oder Kunde auf der  
Strecke?

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting

23.06.2021



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Institut für  
Bahnsysteme und  
Bahntechnik

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International  
<https://creativecommons.org/licenses/>

<b>VORWORT TAGUNGSBAND SRSS 2021 .....</b>	<b>4</b>
<b>POTENZIALE UNTERSCHIEDLICHER ETCS LEVEL 3 UMSETZUNGSVARIANTEN FÜR DEN ZUKÜNFTIGEN BAHNBETRIEB .....</b>	<b>6</b>
<b>REFERENCE CCS ARCHITECTURE (RCA) PLATTFORM – STATUS UND HERAUSFORDERUNGEN .....</b>	<b>23</b>
<b>ZUG- UND GLEISÜBERWACHUNG MIT FASEROPTISCHER SENSORTECHNOLOGIE .....</b>	<b>37</b>
<b>INNOVATIVE LÖSUNGEN FÜR EINE HÖHERE QUALITÄT VON BAHNINFRASTRUKTUR- DATEN .....</b>	<b>48</b>

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting,**

Leiter des Instituts für Bahnsysteme und Bahntechnik an der Technischen Universität Darmstadt

Liebe Mitglieder der Fachcommunity und Bahn-Interessierte,

Verspätungen und andere Abweichungen vom Regelbetrieb sind eines der Hauptärgernisse für die Endkunden der Bahn, erschweren aber auch die Planung der am Bahnbetrieb beteiligten Unternehmen und können teilweise ein Sicherheitsrisiko darstellen. Die Ursachen sind vielfältig und erstrecken sich auf alle Komponenten des Systems Bahn. Im Rahmen des Scientific Railway Signalling Symposiums 2021 warfen am 23. Juni 2021 ca. 85 Fachexpertinnen und Fachexperten gemeinsam unter dem Titel „Abweichungen vom Regelbetrieb – Bleiben Kapazität, Qualität oder Kunde auf der Strecke?“ einen vertieften Blick auf das Potenzial der Leit- und Sicherungstechnik zur Verringerung von Abweichungen vom Regelbetrieb.

Die Beiträge der Konferenz zeigen, dass vielfältige Verbesserungsmöglichkeiten durch innovative technologische Ansätze bestehen. So berichtete Martin Messerli von der SBB AG von aktuellen Entwicklungen aus dem Schweizer Programm smartRail 4.0, das nach einer positiven Bewertung durch das Bundesamt für Verkehr von der Konzeptphase in die Umsetzungsphase tritt. Max Schubert von INCYDE erläuterte, wie durch die strukturierte Kombination von Technik, Prozessen und Architektur die Resilienz im Bahnbetrieb gesteigert werden kann. Die Architektur muss dabei modular aufgebaut sein und die einzelnen Komponenten über Standardschnittstellen kommunizieren, so dass einzelne Komponenten bei neuen technologischen und sicherheitsbezogenen Entwicklungen mit vertretbarem Aufwand ausgetauscht werden können. Hierzu stimmen sich europäische Bahnen in der RCA-Initiative ab, deren aktueller Stand von Michael Leining von NEXTRAIL vorgestellt wurde.

Aus der Praxis berichtete Jens Deutschmann von der DB Netz AG über die erfolgreiche Umsetzung der FPGA-Technologie im badischen Gengenbach, mit der Relaisstellwerke über einen sicheren Compiler effizient in elektronische Logik überführt werden können, wodurch sie u. a. robuster gegenüber Störungen und Ausfällen gemacht werden. Für einen robusten Bahnbetrieb ist auch eine hochverfügbare Ortung entscheidend. Bernd Drapp von AP Sensing gab hierzu einen Einblick in die Potenziale faseroptischer Sensortechnologie (FOS) und Alexandra Grefe von SIGNON stellte das Mobile Mapping System „SATengine“ zur kontinuierlichen Erfassung von Infrastrukturdaten vor, das auf der Auswertung georeferenzierter Videodaten während Messfahrten auf regulär verkehrenden Fahrzeugen basiert.

Bevor innovative Technologien in der Praxis erprobt werden können, muss allerdings die Wissenschaft zunächst Grundlagenarbeit leisten. In diesem Tagungsband möchten wir daher neben den Business Papers von Frau Grefe und Herren Leining und Drapp ebenfalls die wissenschaftliche Arbeit der Tagung

## Academic Paper

veröffentlichen, die an der TU Darmstadt entstanden ist. Bilal Üyümez beschäftigt sich mit dem Vergleich verschiedener Umsetzungsmöglichkeiten von ETCS Level 3, um die Streckenkapazität zu erhöhen und somit die Auswirkungen von Abweichungen vom Regelbetrieb zu verringern.

Wir wünschen Ihnen viel Spaß beim Lesen der genannten Beiträge.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Oetting', is centered on a light gray rectangular background.

Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting

---

## Potenziale unterschiedlicher ETCS Level 3 Umsetzungsvarianten für den zukünftigen Bahnbetrieb

---

Arturo Crespo<sup>1</sup>, Andreas Oetting<sup>2</sup>, Bilal Üyümez<sup>3</sup>

Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik, Technische Universität Darmstadt

### 1 Einleitung und Ziel

Das betriebliche Zielbild der Bahnbetreiber umfasst einen stabileren Bahnbetrieb unter Verdichtung der Zugfolge. Dies bildet die Grundlage für mehr Leistung und Kapazität im Eisenbahnnetz. Um in Zukunft die Leistung und Kapazität im Eisenbahnnetz auch ohne Ausbau der bereits existierenden Infrastruktur steigern zu können, sind Potenziale aus anderen Komponenten der Eisenbahn auszuschöpfen.

Dazu zählt beispielweise das europaweit einheitlich spezifizierte Zugsicherungssystem ETCS. Dieses europaweit einheitliche Zugsicherungssystem wird derzeit in drei so genannten Levels eingeteilt. Von diesen Levels verspricht das Level 3 (ETCS L3) das höchste Kapazitätssteigerungspotenzial bei gleichzeitiger Reduzierung der streckenseitigen Implementierungs- und Betriebskosten.

Demgegenüber stehen bei der Implementierung des Levels 3 mit absolutem Bremswegabstand (engl. Moving-Block) einige noch ungelöste Herausforderungen. Dazu gehört die Notwendigkeit einer zugseitigen Ortung aufgrund von fehlenden infrastrukturseitigen Gleisfreimeldeeinrichtungen. Hinzu kommt die Notwendigkeit einer zugseitigen Zugintegritätsprüfung (engl. Train Integrity Monitoring System, TIMS). Die Aufgabe einer Zugintegritätsprüfung besteht darin, das sichere Zugende zu prüfen und diese Information an die ETCS-Zentrale zu versenden. Die Zugintegritätsprüfung stellt besonders bei Güterzügen eine Herausforderung dar.

Um diese beiden Herausforderungen beim ETCS L3 zu lösen und dadurch eine beschleunigte Migration von ETCS L3 anzustreben, wurden zwei weitere ETCS L3 Umsetzungsvarianten entwickelt, die sich von dem reinen Moving-Block Ansatz dadurch unterscheiden, dass sie mit bestehenden Technologien (z.B. mit reduzierter Anzahl an Gleisfreimeldeeinrichtungen) umgesetzt werden können. Es ist zu untersuchen, ob die beiden Umsetzungsvarianten auch kapazitätssteigernde Potenziale bieten.

Ziel dieses Artikels ist daher die Gegenüberstellung der drei Umsetzungsvarianten hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und Kapazität. In diesem Paper wird vorgestellt, wie die einzelnen Prüfprozesse der smartLogic aufgebaut sind und wie sie modelliert werden.

### 2 Eigenschaften der ETCS Level 3 Umsetzungsvarianten

In diesem Kapitel werden die drei Umsetzungsvarianten beschrieben. Dazu werden zunächst allgemeine Terminologien, die für alle drei Umsetzungsvarianten gelten, eingeführt. Darauf aufbauend werden in den nächsten Abschnitten die einzelnen Umsetzungsvarianten mit ihren spezifischen Eigenschaften beschrieben und die für die Kapazitätsuntersuchung erforderlichen Parameter hergeleitet.

---

<sup>1</sup> crespo@verkehr.tu-darmstadt.de

<sup>2</sup> oetting@verkehr.tu-darmstadt.de

<sup>3</sup> ueyuemez@verkehr.tu-darmstadt.de

## 2.1 Bestimmung der belegten Blocklänge in ETCS Level 3 Umsetzungsvarianten

Die Zugfahrten in ETCS L3 basieren auf einer kontinuierlichen Ortung der Züge. Durch die Information bezüglich des tatsächlichen Standortes eines Zuges generiert die ETCS-Zentrale dynamisch die Fahrerlaubnisse (engl. Movement Authority, MA). Der Zugstandort wird dabei kontinuierlich an die ETCS-Zentrale übertragen.

In ETCS L3 ist die belegte Blocklänge (engl. occupied block length) (d.h. Länge des von einem Zug belegten Streckenabschnitts), die für die Ermittlung des Belegungsgrads entlang der Strecke eines Zuges entscheidend ist, größer als die tatsächliche physische Länge  $l_{train}$  des Zuges. Diese Länge ist in ETCS L3 von der Länge des vom Zug belegten Streckenabschnitts, dem Bremsweg und der Räumfahrzeit abhängig. Die belegte Blocklänge in ETCS L3 ist jedoch im Gegensatz zum Fahren im festen Raumabstand nicht mehr von festen Blockabschnitten, die durch infrastrukturseitige Gleisfreimeldeeinrichtungen begrenzt werden, abhängig.

Die Abbildung 1 zeigt die Parameter, die die belegte Blocklänge von der sicheren Zugspitze (engl. Safe Front End, SFE) bis zum sicheren Zugende (engl. Safe Rear End, SRE).

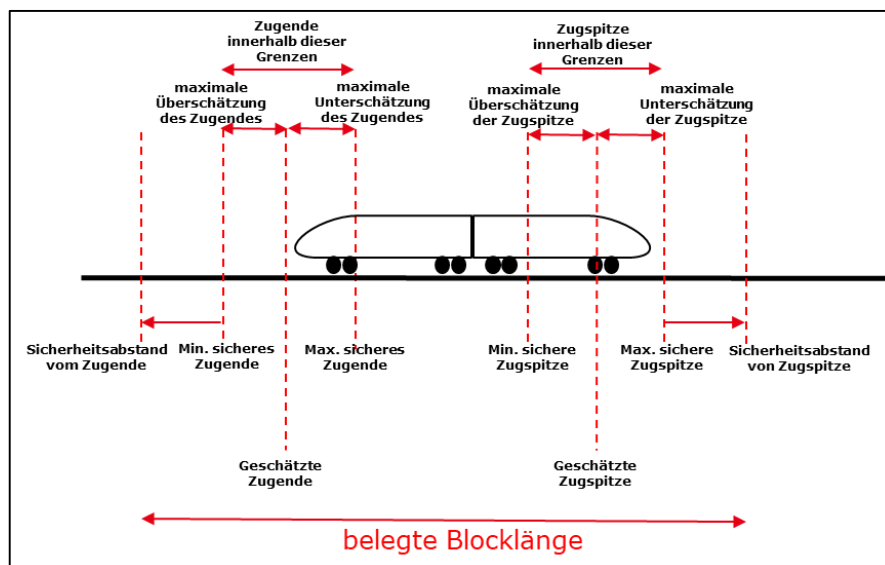


Abb. 1 von einem ETCS L3 Zug belegte Blocklänge in ETCS L3 (eigene Darstellung in Anlehnung an RSB, 2010, S. 26)

Die Position der Zugspitze (engl. Estimated Front End) wird ab der letzten relevanten Balisengruppe (engl. Last Relevant Balise Group, LRBG), die der Zug überfahren hat, geschätzt. Daher ist die Position der Zugspitze und somit auch die belegte Blocklänge mit Unsicherheiten behaftet. Die Unsicherheit ergibt sich aus

- der Abweichung der Genauigkeit des Odometers und
- der Abweichung der Standortgenauigkeit des LRBG.

Folglich erhöht sich die Länge des belegten Blocks mit steigender Unsicherheit.

Es gibt noch zusätzliche Parameter, die die Länge des belegten Blocks beeinflussen. Einer dieser Parameter ist die Zugintegritätsbestätigung (engl. Train Integrity Confirmation, TIC), mit der die Zugintegrität in bestimmten Zeitintervallen an die ETCS-Zentrale gemeldet wird. Da der Abstand zwischen zwei TIC ein zeitabhängiger Parameter ist, beeinflusst die Frequenz, mit der sie gemeldet wird

## Academic Paper

( $\Delta t$ ), die belegte Blocklänge. Je höher die Frequenz ist, desto kürzer wird die belegte Blocklänge und desto schneller kann der belegte Block freigegeben werden.

Hinzu kommen zusätzliche Abstände, die hinter dem Zugende und vor der Zugspitze hinzugefügt werden, um einen sicheren Abstand zum vorausfahrenden (engl. Front Safe Margin, FSM) und nachfolgenden Zug (engl. Rear Safe Margin, RSM) sicherstellen zu können.

Gemäß "Rail Safety and Standards Board" (RSSB, 2010, S. 26) beträgt die berechnete Unsicherheit der Odometrie  $\pm (5 \text{ m} + 5 \% \text{ von } l = 100 \text{ m})$ , hinzu kommen noch mögliche 5 m Abweichung im Balisenstandort, sodass im ungünstigsten Fall eine Abweichung der Zugposition von 15 m resultiert. Unter Verwendung der empfohlenen Werte für die Unsicherheit der Odometrie und des Balisenstandortes kann die belegte Blocklänge in ETCS L3 mit folgender Gleichung ausgedrückt werden.

$$l_{Block} = (v_{Zug} * \Delta t) + l_{Zug} + 2 * (5m + 5m + 5\% * l) + FSM + RSM$$

Die mit dieser Gleichung berechnete Blocklänge hat einen direkten Einfluss auf die Mindestzugfolgezeit zwischen zwei Zügen. Folglich wird die Belegungszeit hauptsächlich durch den Bremsweg des Zuges (d. h. bis zum Stillstand) und die belegte Blocklänge bestimmt.

### 2.2 Umsetzungsvariante A: Level 3 Hybrid

Das Grundprinzip der Umsetzungsvariante ETCS L3 hybrid ist die Unterteilung eines physikalischen Blocks, der durch die vorhandenen Gleisfreimeldeeinrichtungen (engl. Trackside Train Detection, TTD) begrenzt ist, in  $n$  logische virtuelle Blöcke (engl. Virtual Subsections, VSS). Die Länge der einzelnen virtuellen Blöcke wird bei der Projektierung festgelegt. Zusätzlich zu den Gleisfreimeldeeinrichtungen melden die Züge ihre Position über ETCS Train Position Reports (TPRs), was in bestimmten Zeitintervallen erfolgt (vgl. ERTMS, 2018).

Die Umsetzungsvariante ETCS L3 Hybrid ermöglicht einen Mischbetrieb, d.h. es können unterschiedliche Zuggattungen mit oder ohne Zugintegritätsprüfung verkehren. Die virtuellen Blöcke können die Zustände „frei“, „belegt“ und „unbekannt“ annehmen.

Ein virtueller Block gilt als "frei", wenn die Gleisfreimeldeeinrichtung "frei" meldet oder wenn durch die Kombination von TPR und TIC der virtuelle Block zugeseitig sicher freigemeldet wird. Ein virtueller Block gilt als „belegt“, wenn sich ein Zug innerhalb dieses Abschnitts befindet. Ein virtueller Block wird in den Fällen, in denen die Zugintegrität nicht bestätigt werden konnte, als "unbekannt" belegt. In der Abbildung 2 sind drei Momentaufnahmen eines Zuges auf einer freien Strecke dargestellt. Die belegten virtuellen Blöcke sind gelb markiert. Freie virtuelle Blöcke werden grün markiert. Die physikalischen Blöcke sind durch zwei schwarze Balken getrennt, die den Gleisfreimeldeeinrichtungen entsprechen.

Die Abbildung zeigt, dass die belegte virtuelle Blocklänge (Summe der Länge aller belegten VSS) die sichere Länge des Zuges überschreitet. Im oberen Teil der Abbildung befindet sich der Zug im physikalischen Block 1 und belegt die virtuellen Blöcke VSS12 - VSS14. Im zweiten Teil der Abbildung befindet sich der Zug immer noch im physikalischen Block 1, belegt aber die virtuellen Blöcke VSS13 - VSS16. Der virtuelle Block VSS12 wird freigegeben, da der Zug seine Integrität bestätigt hat. Die Zeit zwischen zwei TICs wird beschrieben als  $\Delta t$ . Im letzten Teil der Abbildung hat der Zug die TTD-Grenze zwischen physikalischen Blöcken 1 und 2 passiert, daher ist der gesamte physikalische Block 1 freigegeben.



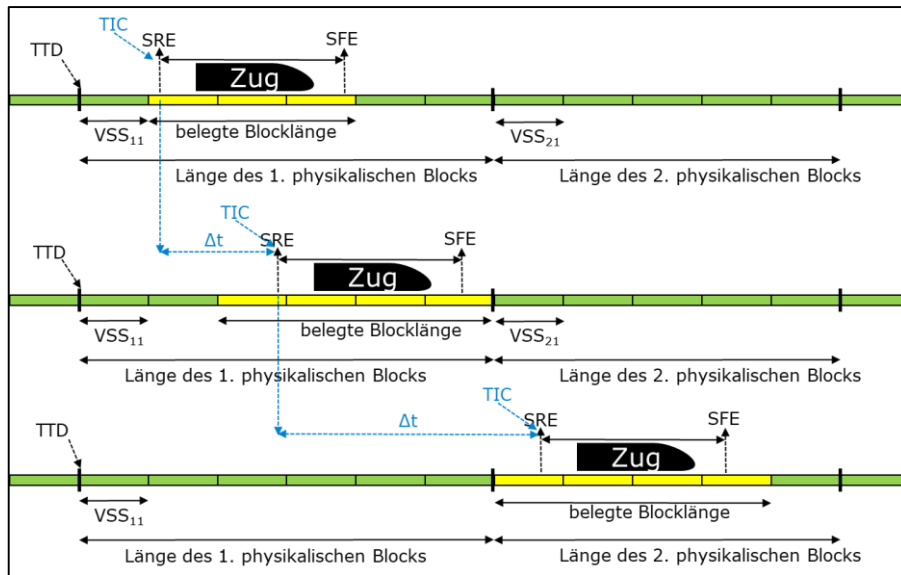


Abb. 2 ETCS L3 Hybrid Umsetzungsvariante A mit TIMS Ausrüstung  
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (ERTMS, 2018)

Wenn sich in dieser Umsetzungsvariante ein Zug ohne TIMS-Ausrüstung in einem physikalischen Block befindet und seine Integrität nicht bestätigt, wird das SRE entgegen der Fahrtrichtung bis zur nächsten Grenze des TTD verlängert. Es werden jedoch weiterhin Positionsmeldungen empfangen, so dass die ETCS-Zentrale das SFE berechnen kann. Dieser Fall wird in der Abbildung 3 dargestellt.

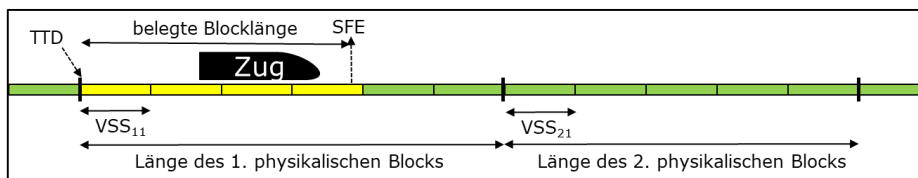


Abb. 3 Blockbelegung in ETCS L3 bei Zügen ohne TIMS-Ausrüstung  
(Quelle: eigene Darstellung)

Die infrastrukturseitige Gleisfreimeldeinrichtung kann auch zur Verkürzung der belegten Blocklänge führen. Dies ist der Fall, wenn ein Zug die Grenze zwischen zwei physikalischen Blöcken passiert hat. In dieser Situation befindet sich seine letzte Integritätsbestätigung noch an einer der virtuellen Blöcke des vorherigen physikalischen Blocks. Die Länge der Restbelegung wird in der Abbildung 4 mit  $y$  dargestellt. Diese Restbelegung wird dann freigegeben, sobald der Zug mit seiner physikalischen Länge das TTD-Element vollständig passiert hat. Somit verschiebt sich das sichere Zugende zum TTD-Element.

## Academic Paper

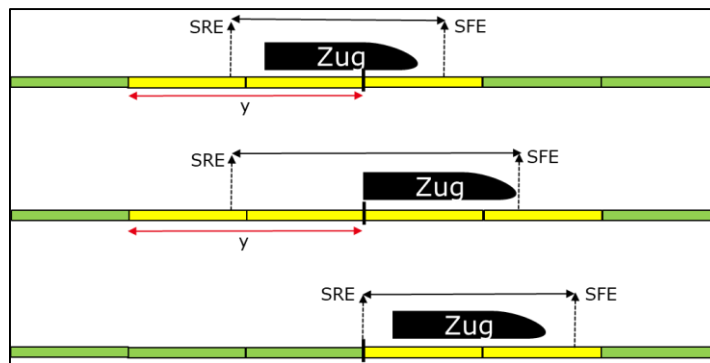


Abb. 4 Freigabe der Restbelegung aufgrund von TTD in der Umsetzungsvariante A  
(Quelle: eigene Darstellung)

Die Räumfahrzeit des Zuges für die belegte Blocklänge, die sich seit dem letzten TIC erstreckt, wird aufgrund eines vorhandenen TTDs beeinflusst. Die Räumfahrzeit für den Zug wird dann von der Zeit, die der Zug benötigt, um die belegte Blocklänge zu räumen, auf die Fahrzeit reduziert, die der Zug benötigt, um das TTD-Element physisch zu räumen. Wenn der Zug also mit einer konstanten Geschwindigkeit fährt, ist die Räumfahrzeit gleich der Zeit, die der Zug benötigt, um seine tatsächliche physische Länge durchzufahren, zuzüglich der Entfernung zwischen dem TTD-Element und dem Ende des physikalischen Blocks.

### 2.3 Umsetzungsvariante B: Moving-Block mit Gleisfreimeldeeinrichtung

Die zweite Umsetzungsvariante umfasst wie bei der ersten Umsetzungsvariante weiterhin Gleisfreimeldeeinrichtungen. Allerdings unterscheidet sich die Umsetzungsvariante B von der Umsetzungsvariante A darin, dass die physikalischen Blöcke nicht mehr in virtuelle Blöcke unterteilt werden.

Folglich hängt die belegte Blocklänge von der Frequenz der Positionsmeldung, der Frequenz der Integritätsbestätigung und der Standortgenauigkeit ab. Demnach wird nach jeder Integritätsbestätigung der Abschnitt zwischen der Position der vorigen Integritätsbestätigung und der Position der aktuellen Integritätsbestätigung freigegeben.

Abbildung 5 beschreibt die Umsetzungsvariante B. Auch hierbei sind drei Momentaufnahmen eines Zuges auf einer freien Strecke dargestellt. Die belegte Blocklänge ist gelb markiert. Grün markierte Stellen sind freie Blockabschnitte in einem physikalischen Block. Die physikalischen Blöcke sind durch zwei schwarze Balken getrennt, die den Gleisfreimeldeeinrichtungen entsprechen.

Analog zu Umsetzungsvariante A können auch in der Umsetzungsvariante B Züge mit und ohne TIMS-Ausrüstung verkehren. Wenn ein Zug ohne TIMS-Ausrüstung den physikalischen Block belegt und dabei seine Integrität nicht bestätigt, wird das SRE entgegen der Fahrtrichtung bis zur nächsten Grenze des TTD verlängert. Es werden jedoch weiterhin Positionsmeldungen empfangen, so dass die ETCS-Zentrale das SFE berechnen kann. Allerdings darf kein nachfolgender Zug den Blockabschnitt belegen, bis der Zug eines das TTD-Element passiert hat.

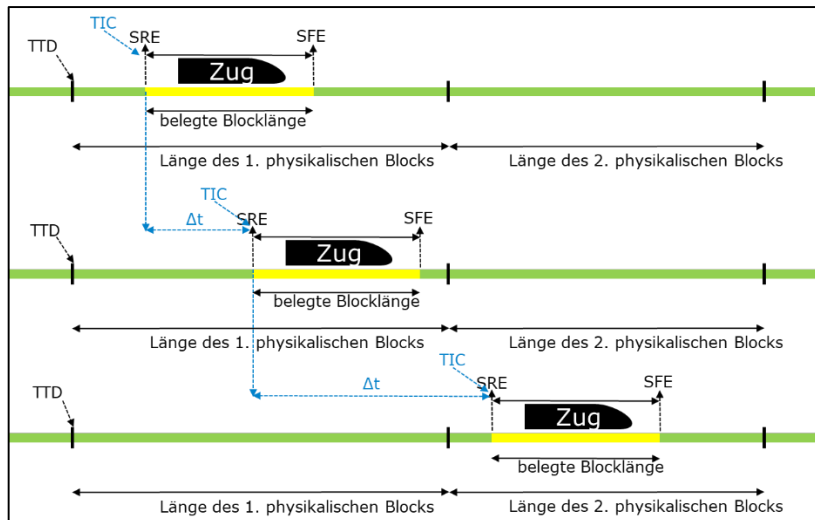


Abb. 5 ETCS L3 Umsetzungsvariante B  
(Quelle: eigene Darstellung)

Die infrastrukturseitige Gleisfreimeldeeinrichtung kann auch bei der Umsetzungsvariante B wie bei der Umsetzungsvariante A zur Verkürzung der belegten Blocklänge führen (Abbildung 6).

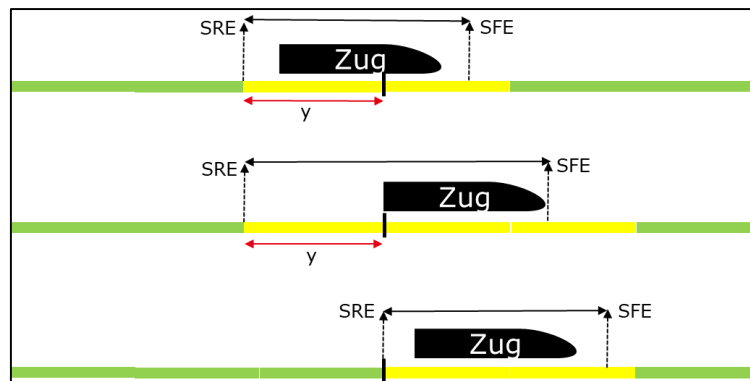


Abb. 6 Freigabe der Restbelegung aufgrund von TTD in der Umsetzungsvariante B  
(Quelle: eigene Darstellung)

## 2.4 Umsetzungsvariante C: Moving-Block ohne Gleisfreimeldeeinrichtung

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, ist die Grundidee von ETCS L3 das Fahren im absoluten Bremswegabstand, ohne dabei infrastrukturseitige Gleisfreimeldeeinrichtungen vorhalten zu müssen. Diese Grundidee wird mit der Umsetzungsvariante C beschrieben. Diese Umsetzungsvariante unterscheidet sich von den zuvor beschriebenen Umsetzungsvarianten darin, dass weder virtuelle Blöcke existieren, noch Gleisfreimeldeeinrichtungen vorgehalten werden. Das führt dazu, dass alle Züge zwingend mit TIMS ausgerüstet sein müssen. Daher dürfen bei dieser Umsetzungsvariante Züge ohne TIMS nicht verkehren. Die grafische Darstellung dieser Umsetzungsvariante ist in der Abbildung 7 zu finden.

Die Abbildung zeigt einen Zug auf einer freien Strecke in drei Momentaufnahmen. Der besetzte Abschnitt ist gelb markiert. Die grüne Markierung beschreibt den freien Abschnitt der Strecke. Die Länge des belegten Abschnitts erstreckt sich bis zur Integritätsbestätigung. Analog zu Umsetzungsvariante B entspricht der Mindestabstand zwischen zwei Zügen dem tatsächlichen Bremsweg des nachfolgenden Zuges mit einem zusätzlichen Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Zug plus einer Zeitdifferenz entsprechend der Positionsmeldung des vorausfahrenden Zuges.

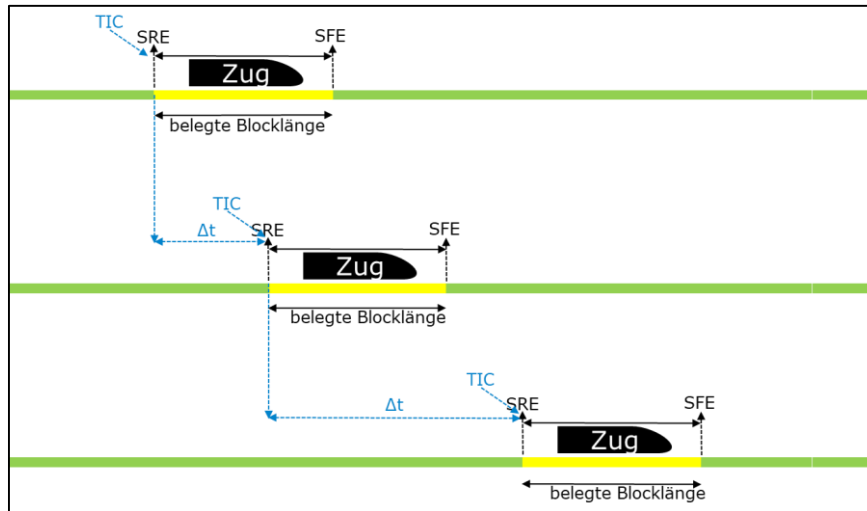


Abb. 7 ETCS L3 Umsetzungsvariante C  
(Quelle: eigene Darstellung)

### 3 Methode und Vorgehen beim Vergleich der Level 3 Umsetzungsvarianten

Im Mittelpunkt des Vergleichs steht die Ermittlung des Kapazitätssteigerungspotenzials der einzelnen Umsetzungsvarianten. Kapazitätsuntersuchungen können, je nach gewünschtem Ergebnis, unterschiedlich durchgeführt werden. Gegenstand dieses Abschnitts ist die Beschreibung einer Methode zur Kapazitätsuntersuchung der drei Umsetzungsvarianten, wobei der Belegungsgrad für die drei Umsetzungsvarianten unter möglichst vielen Randbedingungen (d.h. Betriebsprogramme, Netzelemente, etc.) ermittelt werden sollte.

#### 3.1 Verwendete Methode

Der Kapazitätsverbrauch eines bestimmten Netzelements kann für eine Reihe spezifischer Betriebsbeschränkungen bewertet werden. Dennoch erlaubt eine Methode, mit der systematisch eine Vielzahl der Betriebsbeschränkungen berücksichtigt werden können, allgemein gültige Aussagen hinsichtlich des Kapazitätssteigerungspotenzials der drei Umsetzungsvarianten zu treffen.

Die Methode zur Kapazitätsuntersuchung sollte die Möglichkeit bieten, die Analyse über verschiedene

- Modellzüge
- Betriebsprogramme und
- Netzelemente durchzuführen, um eine möglichst große Anzahl von Betriebsbeschränkungen zu unterstützen.

## Academic Paper

Um eine geeignete Methode für die Kapazitätsuntersuchung der drei Umsetzungsvarianten abzuleiten, ist es zunächst wichtig, die vorliegenden Eingangsgrößen und die gewünschte Qualitätsgröße (Ergebnis) zu identifizieren. Da es sich beim ETCS L3 noch um ein Forschungsvorhaben handelt und die entsprechende fahrzeugtechnische und infrastrukturelle Ausstattung noch nicht vorliegt, existiert auch kein Fahrplan, nach dem ein Betrieb unter L3 durchgeführt wird.

Ohne einen Fahrplan kann der Kapazitätsverbrauch der drei Umsetzungsvarianten unter Verwendung von Durchschnittswerten für betriebliche Abläufe (z.B. Ankunftszeit und Bedienzeit) und der Wahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Zugfolgefälle auf Basis der Betriebsprogramme ermittelt werden. Im Falle der verwendeten Methode im Rahmen dieses Artikels können folgende Annahmen zur Kapazitätsuntersuchung getroffen werden:

- zufällige Ankunftszeiten (mit Variationskoeffizient = 1) in Anbetracht der Tatsache, dass viele Zulaufstrecken auf das zu untersuchende Netzelement verlaufen
- zufällige Bedienzeiten (mit Variationskoeffizient = 1), unter Betrachtung des "First come, first served" Verfahrens.

Unter den oben getroffenen Annahmen würden die im System erzeugten Wartezeiten lediglich von dem Belegungsgrad und der Zugverspätung abhängen. Folglich wird zur Beurteilung der Betriebsqualität der Belegungsgrad als Qualitätsgröße verwendet. Mit dem Belegungsgrad wird angestrebt, in den drei Umsetzungsvarianten das Verhältnis der Anzahl der Züge, die insgesamt ein Netzelement beanspruchen, zum Untersuchungszeitraum zu ermitteln.

### 3.2 Beschreibung des Vorgehens

Die Eingangsgrößen umfassen die Infrastrukturparameter, die Zuggattungen sowie die Definition eines Betriebsprogramms.

Nachdem die Eingangsgrößen identifiziert werden, erfolgt die Herleitung der Formeln, mit denen die Kapazitätsuntersuchung durchgeführt werden können.

Bei Moving Block kann die Länge des Fahrwegabschnitts theoretisch gegen Null gehen, so dass sich anstelle einer Sperrzeitentreppe ein Sperrzeitenband ergeben würde. Tatsächlich ist weder eine kontinuierliche Übertragung neuer Movement Authorities noch eine kontinuierliche Übermittlung der Zugintegrität aufgrund der verfügbaren Bandbreiten der Telekommunikation realistisch. Daher hat das Sperrzeitenband ebenfalls eine Treppenform.

Aus den Sperrzeitentreppen lassen sich die zugfolgefallspezifischen Mindestzugfolgezeiten ermitteln. Durch deren gewichtete Mittelung anhand der stochastisch ermittelten Wahrscheinlichkeiten der Zugfolgefälle ergeben sich die mittleren Mindestzugfolgezeiten, daraus mit der Zuganzahl im Betrachtungszeitraum der Belegungsgrad der drei Umsetzungsvarianten.

## 4 Kapazitätsuntersuchung der Level 3 Umsetzungsvarianten

Aufgrund des generischen Untersuchungsansatzes werden die Eingangsgrößen entsprechend abstrahiert gewählt.

## Identifikation der Eingangsparameter für die Belegungsgradsanalyse

### 1. Beschreibung der Netzelemente

Kapazitätsuntersuchungen können für unterschiedliche Netzelemente, auf denen die Betriebsprogramme ausgeführt werden, durchgeführt werden. Das erste Netzelement beschreibt eine freie Strecke. Die freie Strecke in ETCS L3 umfasst die Länge des gemeinsamen Laufweges der Modellzüge in einem Betriebsprogramm.

Das zweite Netzelement umfasst zwei freie Strecken, die über einen Haltepunkt miteinander verbunden sind. Der Haltepunkt wird berücksichtigt, da der Belegungsgrad beeinflusst wird, wenn Personenzüge am Haltepunkt halten.

### 2. Parameter der Modellzüge

Die Kapazitätsuntersuchung erfordert die Erstellung einer Reihe von Modellzügen, die über die definierten Netzelemente betrieben werden. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Modellzüge sind

- schnelle und langsame Personenzüge im Fernverkehr (SPNV und SPFV),
- Personenzüge im Nahverkehr (SPNV) sowie
- schnelle und langsame Güterzüge (SGV).

Die Modellzüge mit ihren physikalischen und fahrdynamischen Eigenschaften sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1 Modellzüge einschließlich der Eigenschaften nach (Wende, 2012, S.71; ERA ETCS, 2016)

Zugart	Beschleunigung (m/s <sup>2</sup> )	Bremsverzögerung (m/s <sup>2</sup> )	Modellzug-Länge (m)	v_max (km/h)
<b>SPFV</b>	0.3	0.5	400	160
<b>SPNV</b>	0.3	0.35	300	160
<b>GV-F</b>	0.2	0.3	600	120
<b>GV-S</b>	0.2	0.26	750	90
<b>S-Bahn</b>	0.8	0.5	200	120
<small>SPFV: Schienenpersonenfernverkehr; SPNV: Schienenpersonennahverkehr; GV-F: Güterzug schnell; GV-S: Güterzug langsam; S-Bahn</small>				

### 3. Betriebsprogramm

Nachdem die Infrastrukturparameter und Modellzüge beschrieben wurden, werden diese in ein Betriebsprogramm aufgenommen.

Wie bereits oben erläutert, wird die Kapazitätsuntersuchung sowohl für den reinen Personenverkehr als auch für den Mischverkehr durchgeführt. Da der Mischverkehr neben den unterschiedlichen Zuggattungen auch eine nur teilweise vorhandene TIMS-Ausrüstung der Züge berücksichtigt, werden insgesamt drei Betriebsprogramme definiert. Das erste Betriebsprogramm beschreibt einen homogenen Verkehr, der nur aus mit TIMS ausgerüsteten Nahverkehrszügen besteht. Das zweite Betriebsprogramm betrachtet einen Mischverkehr, bei dem alle Züge mit TIMS ausgerüstet sind. Das dritte Betriebsprogramm beschreibt ebenfalls einen Mischverkehr, bei dem jedoch nur Personenzüge mit TIMS ausgerüstet sind.

## Academic Paper

Tab. 2 Betriebsprogramme (eigene Darstellung mit Werten aus DB Netz RIL-413, 2009 und Menius, Matthews, 2020, S. 88)

Betriebsprogramm 1			Betriebsprogramm 2			Betriebsprogramm 3		
Klasse R120			Klasse M160			Klasse M160		
ausschließlich S-Bahn			Mischverkehr			Mischverkehr (ohne TIMS)		
Anzahl der Züge/Stunde	SPFV:	0	Anzahl der Züge/Stunde	SPFV:	3	Anzahl der Züge/Stunde	SPFV:	3
	SPNV:	0		SPNV:	4		SPNV:	4
	S-Bahn:	17		S-Bahn:	0		S-Bahn:	0
	GV-F =	0		GV-F =	2		GV-F =	2
	GV-S =	0		GV-S =	1		GV-S =	1
Gesamtanzahl der Züge/Stunde = 17			Gesamtanzahl der Züge/Stunde = 10			Gesamtanzahl der Züge/Stunde = 10		
Gesamtanzahl der Züge/4 Stunden = 68			Gesamtanzahl der Züge/4 Stunden = 40			Gesamtanzahl der Züge/4 Stunden = 40		
Infrastructure Parameters			Infrastructure Parameters			Infrastructure Parameters		
I_gemeinsamer Laufweg	10000 m		I_gemeinsamer Laufweg	20000 m		I_gemeinsamer Laufweg	20000 m	
I_physikalisch	2000 m		I_physikalisch	4000 m		I_physikalisch	4000 m	
max I_VSS	1500 m		max I_VSS	4000 m		max I_VSS	4000 m	

### 4. Weitere Einflussgrößen

Sowohl die Meldung der Zugintegrität als auch der kontinuierlichen Position während der Zugfahrt findet über einen funkbasierten Übertragungsweg statt. Zudem werden die Systeme (Stellwerk, ETCS und andere Fahrzeugseitige Systeme) Reaktionszeiten aufweisen. Daher müssen in diesem Zusammenhang folgende Prozessparameter definiert werden, die in ETCS L3 ebenfalls einen Einfluss auf die Kapazität haben.

- Häufigkeit der Zugintegritätsbestätigung TIC
- Systemreaktionszeiten und
- Latenzzeiten

## 5 Auswertung der Kapazitätsuntersuchung der L3 Umsetzungsvarianten

### 1. Vergleich der drei Varianten auf der freien Strecke

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse aus dem Vergleich des für die Umsetzungsvarianten berechneten durchschnittlichen Belegungsgrads (ausgedrückt in Prozentwerten) für jedes der betrachteten Betriebsprogramme auf einer freien Strecke zusammen. Aus Tabelle 3 kann aus der Spalte drei entnommen werden, dass für das Betriebsprogramm 1 der berechnete Belegungsgrad für die Variante B im Durchschnitt 3,9 % niedriger ist als für die Variante A bzw. 1,2 % niedriger als für die Variante C.

Tab. 3 Durchschnittlicher Belegungsgrad der drei Umsetzungsvarianten – freie Strecke

(Quelle: eigene Berechnung)

Varianten [ $\rho_x/\rho_y$ ]	Betriebsprogramm 1			Betriebsprogramm 2			BP 3
	↓B/C↑	↓B/A↑	↓C/A↑	↓B/C↑	↓B/A↑	↓C/A↑	↓B/A↑
$1 - (\rho_x/\rho_y)$ [%]	1,2	3,9	2,6	0,3	1,3	1,1	0,6

## Academic Paper

Es ist zu berücksichtigen, dass der Vergleich aus der Tabelle 3 für das Betriebsprogramm 3 nur zwischen den Umsetzungsvarianten A und B erfolgt, da der Umsetzungsvariante C das Betriebsprogramm 3 nicht umsetzbar ist. Dies gilt für alle untersuchten Netzelemente. Folgende vergleichende Aussagen können über die drei Umsetzungsvarianten hinsichtlich des Belegungsgrads auf einer freien Strecke festgehalten werden:

- Die Umsetzungsvariante B schneidet im Vergleich zu den anderen beiden Umsetzungsvarianten für in allen Betriebsprogrammen besser ab (d.h. weniger Belegungsgrad). Der Vergleich ist sowohl in der Tabelle 3 als auch in den Abbildungen 8-10 dargestellt. Der geringe Belegungsgrad ist zum einen auf die vorhandenen TTD-Elementen zurückzuführen. Zum anderen sorgen die fehlenden virtuellen Blöcke für mehr Kapazität auf der freien Strecke.
- Beim Vergleich zwischen den Umsetzungsvarianten A und C ist zu verzeichnen, dass die Umsetzungsvariante C durchweg einen niedrigeren Belegungsgrad aufweist als die Umsetzungsvariante A. Der höhere Belegungsgrad der Umsetzungsvariante A ist auf die vorhandenen virtuellen Blöcke zurückzuführen.
- Für das Betriebsprogramm 3 gibt es fast keinen signifikanten Unterschied im Belegungsgrad zwischen den Umsetzungsvarianten A und B. Dies könnte der Fall sein, da Züge ohne TIMS-Ausrüstung auf die TTD-Elemente angewiesen sind, um den Streckenabschnitt hinter dem Zug zu räumen.
- Der Einfluss der TIC-Frequenz auf den Belegungsgrad ist in allen drei Umsetzungsvarianten gleich (siehe Abbildung 8).
- Die Länge des gemeinsamen Laufwegs im Betriebsprogramm 1 hat einen Einfluss auf den Belegungsgrad, da es sich hierbei um einen homogenen Betrieb (S-Bahn) handelt.
- Bei den Betriebsprogrammen 2 und 3 ist der Belegungsgrad umso höher, je länger der gemeinsame Laufweg ist. Das liegt daran, dass im Mischverkehr Züge mit unterschiedlichen Eigenschaften verkehren, welche den Belegungsgrad signifikant beeinflussen (Siehe Abbildung 8 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. und 9).
- Durch das Vorhandensein von TTD-Elementen ist bei der Umsetzungsvariante B im Vergleich zu Umsetzungsvariante C ein gewisser Gewinn an Belegungsgrad zu erkennen. Der Gewinn wird bewirkt, wenn ein Zug das TTD-Element physikalisch passiert hat, obwohl das gemeldete sichere Zugende noch im vorigen Abschnitt liegt.
- Die Länge des physikalischen Blocks hat einen Einfluss auf den Belegungsgrad für das Betriebsprogramm 3 über beide Umsetzungsvarianten A und B. Je kürzer die physikalischen Blöcke sind, desto schneller werden die Züge die TTD-Elemente passieren, wodurch der zurückliegende Abschnitt für die nachfolgenden Züge freigemeldet wird.

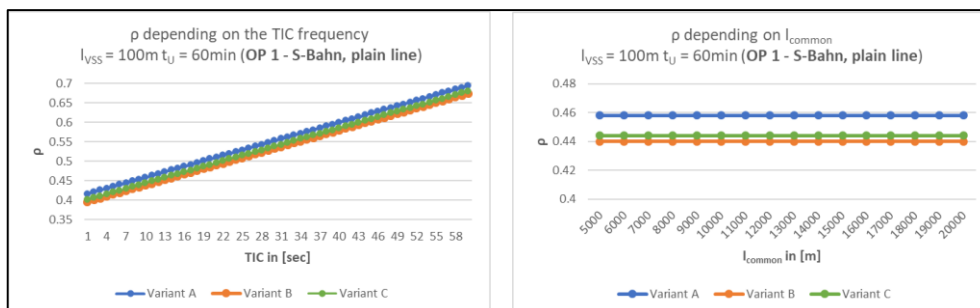


Abb. 8 Grafischer Vergleich der drei Umsetzungsvarianten im Betriebsprogramm 1 (freie Strecke)  
(Quelle: eigene Darstellung)



## Academic Paper

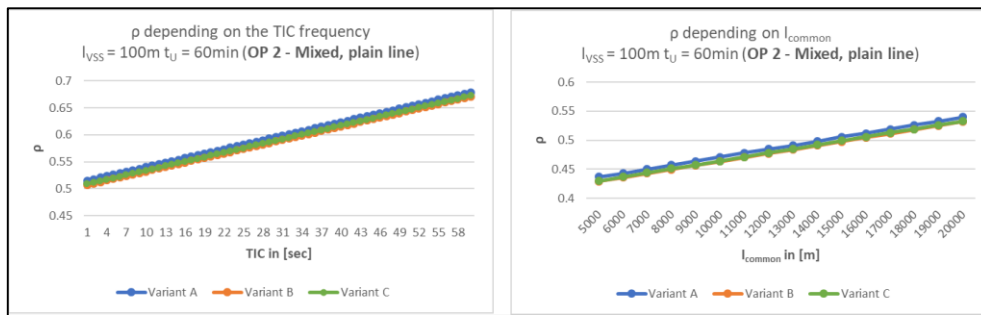


Abb. 9 Grafischer Vergleich der drei Umsetzungsvarianten im Betriebsprogramm 2 (freie Strecke)  
(Quelle: eigene Darstellung)

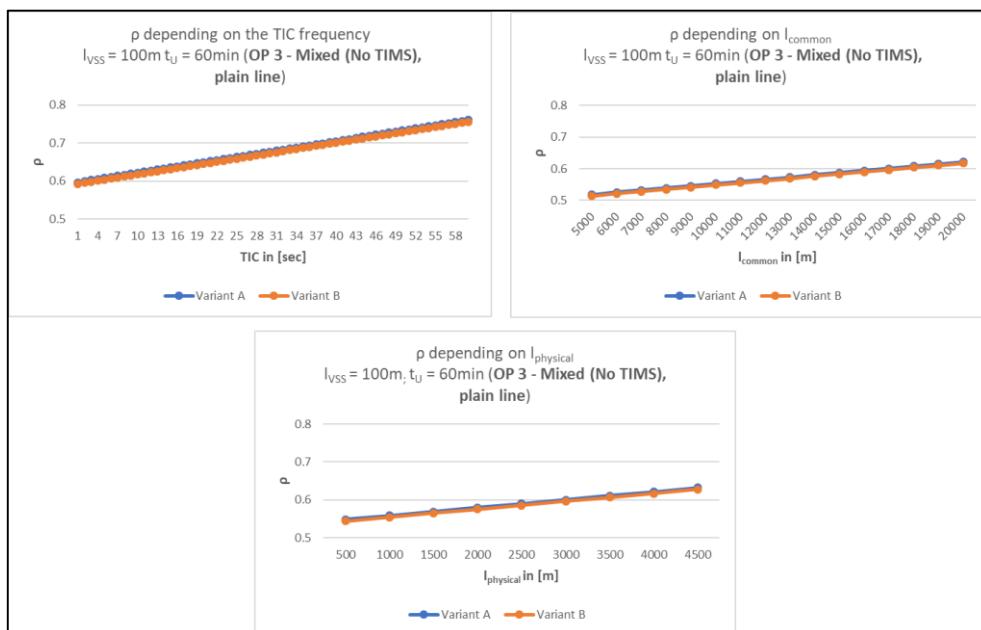


Abb. 10 Grafischer Vergleich der drei Umsetzungsvarianten im Betriebsprogramm 3 (freie Strecke)  
(Quelle: eigene Darstellung)

### 2. Vergleich der drei Umsetzungsvarianten am Haltepunkt

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse aus dem Vergleich des für Umsetzungsvarianten berechneten durchschnittlichen Belegungsgrads (ausgedrückt in Prozentwerten) für jedes der betrachteten Betriebsprogramme an einem Haltepunkt zusammen. Aus der Tabelle 4 kann entnommen werden, dass die Kapazitätsverbräuche der Umsetzungsvarianten B und C durchschnittlich 5,6 % niedriger sind als Umsetzungsvariante A. Der direkte Vergleich zwischen den Umsetzungsvarianten B und C liefert keinen Unterschied.

## Academic Paper

Tab. 4 Durchschnittlicher Belegungsgrad der drei Umsetzungsvarianten – Haltepunkt  
(Quelle: eigene Berechnung)

Varianten [ $\rho_x/\rho_y$ ]	Betriebsprogramm 1			Betriebsprogramm 2			BP 3
	↓B/C↑	↓B/A↑	↓C/A↑	↓B/C↑	↓B/A↑	↓C/A↑	↓B/A↑
$1 - (\rho_x/\rho_y)$ [%]	0,0	5,6	5,6	0,1	2,2	2,1	1,5

Folgende vergleichende Aussagen können über die drei Umsetzungsvarianten hinsichtlich des Belegungsgrads an einem Haltepunkt festgehalten werden:

- Die Umsetzungsvariante B schneidet im Vergleich zu der Umsetzungsvariante A in allen Betriebsprogrammen besser ab (d.h. weniger Belegungsgrad). Der Vergleich ist sowohl in der Tabelle 4 als auch in den Abbildungen 11-13 dargestellt. Der geringe Belegungsgrad ist zum einen auf die vorhandenen TTD-Elementen zurückzuführen. Zum anderen sorgen die fehlenden virtuellen Blöcke für mehr Kapazität auf der freien Strecke.
- Andererseits werden die marginalen Vorteile, die die TTD-Elemente mit sich bringen und die auf der freien Strecke der Umsetzungsvariante B einen Vorteil gegenüber der Umsetzungsvariante C verschafft haben, an einem Haltepunkt nahezu neutralisiert. Das ist darauf zurückzuführen, dass der kritische Punkt nicht mehr die Länge des gemeinsamen Laufwegs ist, sondern die Position des Haltepunkts.
- Der Einfluss der TIC-Frequenz auf den Belegungsgrad ist auch in diesem Falle in allen drei Umsetzungsvarianten gleich (siehe Abbildung 11).
- Aufgrund der Annahme, dass im Betriebsprogramm 1 alle Züge am Haltepunkt halten, hat die Länge des gemeinsamen Laufwegs keinen Einfluss auf den Belegungsgrad.
- Der Einfluss der Länge des Gemeinsamen Laufwegs auf den Belegungsgrad im Falle eines Haltepunkts ist gedämpft. Der Grund dafür liegt darin, dass der Haltepunkt die Zugfahrten im gemeinsamen Laufweg „homogenisiert“ (alle Personenzüge halten am Haltepunkt).
- Im Mischverkehr hat die Position des Haltepunkts einen signifikanten Einfluss auf den Belegungsgrad. Je weiter entfernt der Haltepunkt vom Beginn des gemeinsamen Laufwegs liegt, desto geringer ist der Belegungsgrad. Dieses Phänomen wird in der Abbildung 12 dargestellt.

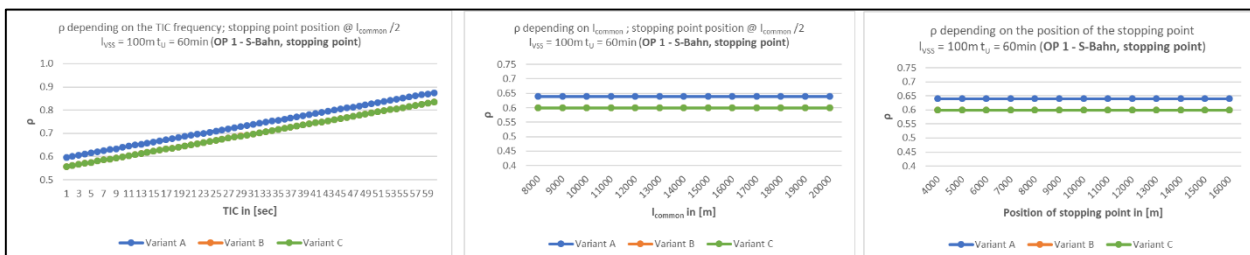


Abb. 11 Grafischer Vergleich der drei Umsetzungsvarianten im Betriebsprogramm 1 (Haltepunkt)  
(Quelle: eigene Darstellung)

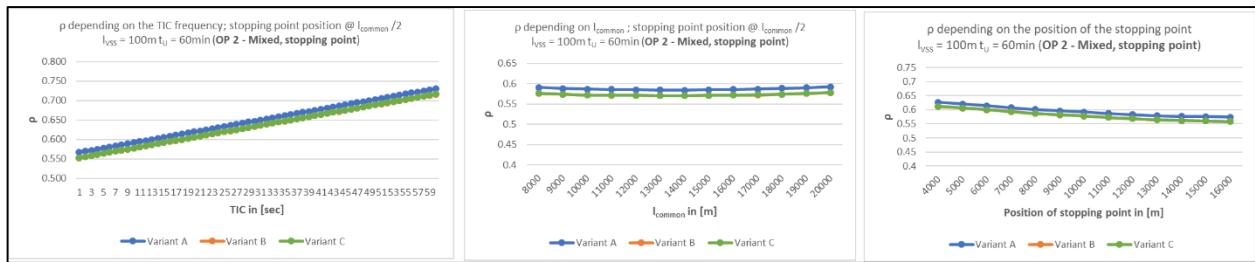


Abb. 12 Grafischer Vergleich der drei Umsetzungsvarianten im Betriebsprogramm 2 (Haltepunkt)  
(Quelle: eigene Darstellung)

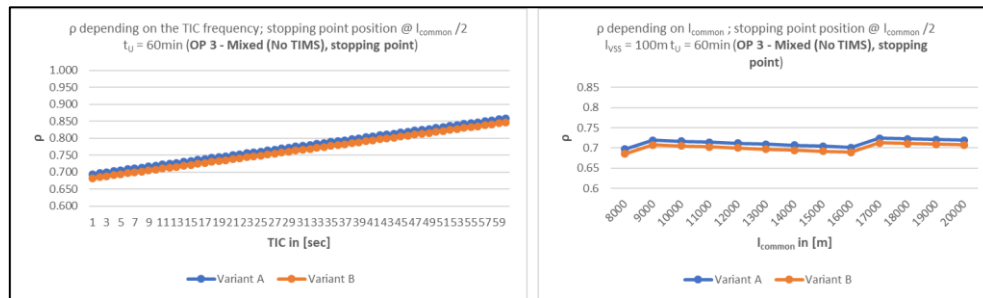


Abb. 13 Grafischer Vergleich der drei Umsetzungsvarianten im Betriebsprogramm 3 (Haltepunkt)  
(Quelle: eigene Darstellung)

## Qualitative Analyse der Auswirkungen von Störungen auf den Belegungsgrad in ETCS L3

Der Bahnbetrieb ist aufgrund seiner Komplexität anfällig für das Auftreten diverser Störungen. Diese Störungen können entweder endogen an den technischen Systemen entstehen oder durch externe Einflüsse verursacht werden. Im Folgenden wird der Einfluss zwei systeminterner Störungen auf den Belegungsgrad untersucht. Da keine quantifizierbaren Größen zu den Ausfallraten der technischen Systeme im ETCS L3 existieren, erfolgt die Untersuchung qualitativ. Die Störungen, die einen signifikanten Einfluss auf den Belegungsgrad haben sind wie folgt:

- Störung an der Zugintegritätsbestätigung
- Kommunikationsstörung
  - fahrzeugseitige Kommunikationsstörung
  - Störung an der infrastrukturseitigen Kommunikation (z.B. im gesamten Zuständigkeitsbereich einer ETCS-Zentrale)

Diese Störungen führen entweder zur Geschwindigkeitsreduzierung von Zügen oder zur reduzierten Verfügbarkeit eines Infrastrukturbereichs aufgrund des Stillstandes (nach Zwangsbremmung) der Züge. In beiden Fällen wird der Belegungsgrad in allen drei Umsetzungsvarianten stark beeinflusst. Folgende qualitative Aussagen können über den Einfluss der Störungen auf den Belegungsgrad getroffen werden:

- In den Umsetzungsvarianten A und B können kurze physikalische Blöcke die Störung an der Zugintegritätsbestätigung durch die TTD-Elemente kompensieren.
- Die Umsetzungsvariante C ist von einer fehlenden oder gestörten Zugintegritätsbestätigung besonders betroffen, da in dieser Umsetzungsvariante keine TTD-Elemente existieren und das Sperrzeitband mit fehlender Zugintegritätsbestätigung gedehnt wäre.
- Im Falle einer Kommunikationsstörung könnte ein separater Kommunikationsweg genutzt werden, um die MAs an die Züge übertragen zu können.

6 Fazit und Ausblick

Aufgrund der Multiparameterabhängigkeit des Belegungsgrads der drei L3-Varianten ist eine endgültige Umsetzungsentscheidung für eine der drei Umsetzungsvarianten beim derzeitigen Stand der Untersuchung daher nicht möglich.

Um sicherzustellen, dass die in diesem Bericht bereitgestellten Ergebnisse als Grundlage für die Entscheidungsfindung verwendet werden können, wäre eine Sensitivitätsanalyse über weitere Einflussfaktoren erforderlich. Auf Basis der erzielten Ergebnisse und des aktuellen Untersuchungsstandes ist jedoch eine qualitative und vergleichende Bewertung der drei Umsetzungsvarianten in den Tabellen 10-12 zusammengefasst.

Die Abbildung 14 gibt einen qualitativen Überblick über die Ergebnisse der Belegungsgradanalyse, die für alle drei betrachteten Umsetzungsvarianten durchgeführt wurde. Die Abbildung weist denjenigen Umsetzungsvarianten ein grünes "+"-Symbol zu, bei denen der Belegungsgrad am geringsten ist. In dieser Abbildung sind alle drei Umsetzungsvarianten, alle drei Betriebsprogramme sowie die beiden Netzelemente (freie Strecke und Haltepunkt) dargestellt. Im Betriebsprogramm 1 existiert ein homogener Betrieb und alle Züge sind mit TIMS ausgerüstet. Das Betriebsprogramm 2 stellt einen Mischverkehr dar und hierbei sind ebenfalls alle Züge mit TIMS ausgerüstet. Im Betriebsprogramm 3, welches ebenfalls einen Mischverkehr darstellt, sind nur alle Personenzüge mit TIMS ausgerüstet.

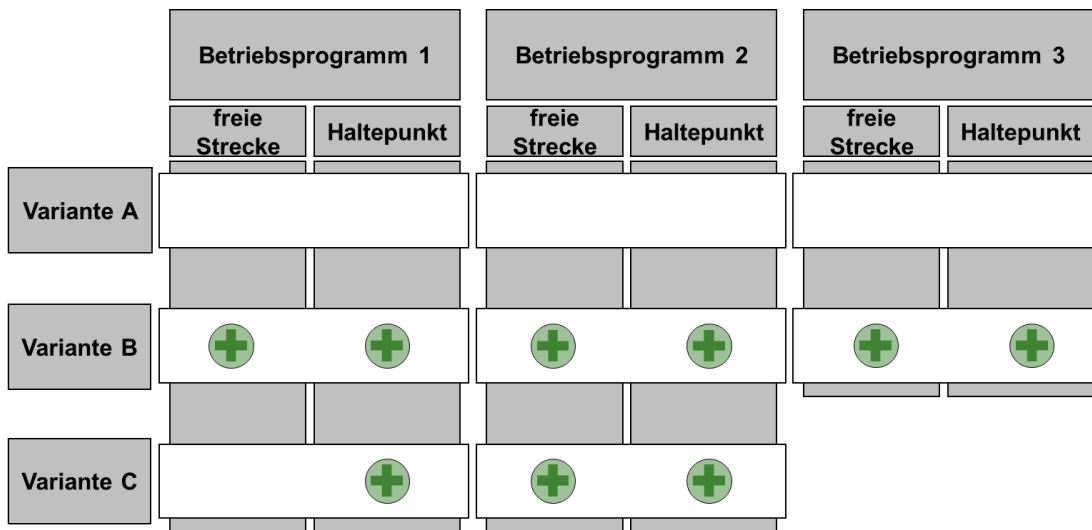


Abb. 14 Qualitativer Vergleich der drei Umsetzungsvarianten hinsichtlich des Belegungsgrads (Quelle: eigene Darstellung)

Es kann schlussgefolgert werden, dass die Umsetzungsvariante B für jeden bewerteten Fall mindestens so gut ist wie die Umsetzungsvariante C. Jedoch ist die Umsetzungsvariante B aufgrund der Existenz von TTD-Elementen leicht im Vorteil im Vergleich zu C.

Wenn darüber hinaus die Länge der virtuellen Blöcke in Umsetzungsvariante A dynamisch verändert werden kann (d. h. auf eine sehr geringe Länge reduziert werden kann), dann liefert diese Umsetzungsvariante annähernd vergleichbare Ergebnisse wie bei den anderen beiden Umsetzungsvarianten. Die Umsetzungsvariante B punktet nicht nur im Belegungsgrad, sondern bietet aufgrund der vorhandenen TTD-Elementen auch einen robusteren Betrieb.

## Academic Paper

Aus den beiden betrachteten Störungsfällen kann schlussgefolgert werden, dass TTD-Elemente einen robusten Betrieb auch im Falle von Störungen erlauben. Daher sind die Umsetzungsvarianten A und B im Störungsfall im Vergleich zu der Umsetzungsvariante C besser.

Schließlich kann schlussgefolgert werden, dass in Zukunft die Existenz von TTD-Elementen an Haltepunkten (aber auch an Weichen) den Belegungsgrad signifikant reduzieren und zugleich einen robusten Betrieb ermöglichen.

Offene Punkte, die im Rahmen dieses Artikels nicht behandelt werden konnten, aber in Zukunft adressiert werden sollten, sind wie folgt:

- Eine Kapazitätsuntersuchung der drei Umsetzungsvarianten auf einer Weiche,
- Durchführung einer vollständigen Sensitivitätsanalyse über weitere Einflussfaktoren,
- Durchführung einer dynamischen Belegungsgradanalyse in Abhängigkeit der dynamischen Parameter in den Umsetzungsvarianten, wie z.B. dynamische Variation der virtuellen Blöcke oder dynamische Variation der Frequenz der Zugintegritätsbestätigung und
- Einfluss von unterschiedlichen Rückfallebenen auf den Belegungsgrad in den drei Umsetzungsvarianten sowie die quantitative Bewertung der störungsbedingten Robustheit der verschiedenen Umsetzungsvarianten.

### 7 Literaturverzeichnis

- [1] DB Netz (2009): Richtlinie RIL-413, Infrastruktur gestalten. DB Netz AG, Frankfurt am Main, 2009
- [2] ERA: (2016): System Requirements Specification, ETCS Subset 026 chapter 3. ERA UNISIG EEIG ERTMS USERS GROUP, 2016.
- [3] ERTMS User Group (2018): Hybrid ERTMS/ETCS Level 3. EUG Reference: 16E042, Version 1.C, vom 13.07.2018
- [4] Menius R., Matthews V., (2020): Bahnbau und Bahninfrastruktur, Ein Leitfaden zu bahnbezogenen Infrastrukturthemen, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 10. Auflage, 2020.
- [5] RSSB (2010): ETCS System Description - Railway Group Guidance Note, Rail Safety and Standards Board Limited, London, 2010
- [9] Wende D. (2003): Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Vieweg+Teubner Verlag Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1. Auflage, 2003

Dr. Michael Leining, Bernhard Rytz

NEXTRAIL GmbH, SBB

#### 1 Einleitung

Das Eisenbahnsystem spielt eine Schlüsselrolle bei der Bereitstellung von Lösungen für die gesellschaftlichen Herausforderungen der Gesellschaft, wie dem globalen Klimawandel, der Urbanisierung und der wachsenden Verkehrsnachfrage. Dadurch steigt der Druck auf alle Akteure, die Kapazität, Qualität und Kosten des Bahnsystems zu optimieren. Ein wichtiger Bestandteil der Optimierung des Bahnsystems ist die Eisenbahnsicherungstechnik. Seit mindestens 20 Jahren gibt es Initiativen, wichtige Teile der Zugsteuerungs- und Zugsicherungssysteme (ZZS) zu harmonisieren. Am Anfang der Harmonisierung stand der Gedanke der Interoperabilität, um den grenzüberschreitenden Verkehr zu vereinfachen und die Systemvielfalt in Europa zu minimieren. Ausgehend von diesem Grundgedanken wurde das europäische Zugsicherungs- und Leitsystem ETCS entwickelt und eingeführt.

Mit zunehmender Standardisierung der Komponenten im industriellen Umfeld entstanden weitere Initiativen zur Standardisierung der Leit- und Sicherungstechnik. Eine der Initiativen ist EULYNX, welche die Standardisierung der Schnittstellen der Stellwerkstechnik zu den Umsystemen, wie zum Beispiel den Weichen, Bahnübergängen oder Signalen umsetzt. Ziel dieser Initiative ist die Senkung der Lebenszykluskosten durch eine kreuzweise Austauschbarkeit der signaltechnischen Komponenten. Darüber hinaus gab es weitere europäische Forschungsvorhaben wie Eurointerlocking, INESS oder aktuell Shift2Rail (S2R).

Allerdings haben nicht alle Initiativen implementierbare Spezifikationen und attraktive Geschäftsmodelle für Bahnbetreiber und Industrie geliefert. Nur die ERTMS- und EULYNX-Spezifikationen stellen einen ausgereiften Satz von Spezifikationen zur Verfügung. Die Spezifikationstiefe unterscheidet sich dabei jedoch. Während ERTMS-Spezifikationen auf funktionaler Ebene liefert, bewegen sich die EULYNX-Spezifikationen auf semi-formaler Ebene.

Lange Zeit war es strittig, ob ERTMS ein positives Geschäftsmodell für Infrastrukturbetreiber und Eisenbahnverkehrsunternehmen anbieten kann. Erst diverse Studien, wie zum Beispiel in den Niederlanden oder auch Deutschland (BMVI 2018) haben gezeigt, dass bei der Betrachtung aller sozio-ökonomischen Faktoren ein positives Gesamtbild dargestellt werden kann. Da sich der gesamtgesellschaftliche Nutzen von ERTMS nicht in den Geschäftsmodellen von Eisenbahninfrastrukturbetreibern und Eisenbahnverkehrsunternehmen widerspiegelt, ist eine verstärkte Förderung der öffentlichen Hand notwendig. Diese Notwendigkeit wurde im nationalen wie im europäischen Kontext erkannt und findet heute ihren Niederschlag in entsprechend ausgestatteten Förderprogrammen.

Hingegen ist die Darstellung der wirtschaftlichen Vorteile der EULYNX-Spezifikationen einfacher und über den Lebenszyklus stringenter zu argumentieren. Die tatsächlichen wirtschaftlichen Effekte der Initiative werden in wenigen Jahren bewertbar sein, da erste Projekte mit den Spezifikationen derzeit im Bau sind.

## 2 Ausgangssituation / Motivation von RCA am Beispiel der SBB

Das europäische Zugsicherungs- und Leitsystem ETCS ist unstrittig ein System, welches die technische Interoperabilität in Europa vorantreibt. Historisch gewachsen unterscheiden sich die Signalsysteme in Europa sehr stark hinsichtlich ihrer Technik und der damit verbundenen bahnbetrieblichen Prozesse. Ferner unterscheiden sie sich hinsichtlich des Sicherheitsniveaus (Safety). Für einige Länder, wie die Schweiz oder Luxemburg war ETCS eine Möglichkeit, den Sicherheitsstandard ihrer Zugsicherung anzuheben und gleichzeitig europäische Vorgaben umzusetzen.

In der Schweiz wählte man auf Grund der vorhandenen Stellwerkslandschaft und der kurzfristigen Umsetzbarkeit für den landesweiten Rollout zunächst die technische Umsetzung mit ETCS Level 1 Limited Supervision, kurz ETCS L1 LS. Entscheidender Vorteil von ETCS L1 LS war die Weiterverwendbarkeit der vorhandenen Stellwerkstechniken, da die Signalbegriffe im Feld abgegriffen und in ETCS-Telegramme umgewandelt werden können. Da die Anpassungen im Gesamtsystem vergleichsweise gering waren, konnte die Migration recht schnell erfolgen und die Kosten der Lösung waren im Vergleich zu einer gleichzeitigen Erneuerung der Stellwerke geringer (s. Sommer 2011 oder Behnsch 2018). Da die Fahrzeuge zunächst mit einem Übersetzungsmodul (ETM) ausgerüstet wurden, um spezifikationskonforme ETCS-Telegramme zu lesen, war die initiale Umrüstung von ETCS L1 LS vergleichsweise kostengünstig. In einem weiteren Schritt konnten die Fahrzeuge nun schrittweise nach Bedarf mit einem reinen ETCS-On-Board-Gerät ohne STM-Funktionalität ausgerüstet werden. Die Verwendung des Funk-basierten Level 2 von ETCS blieb zunächst einer Pilotstrecke und den beiden Tunnelprojekten Lötschberg und Gotthard vorbehalten.

Da, ähnlich wie in den meisten europäischen Ländern, eine Ablösung der Stellwerkslandschaft in den nächsten Jahren ansteht, gibt es immer wieder Überlegungen, im Zuge einer Stellwerkserneuerung die Strecken auf ETCS Level 2 umzustellen. Somit könnten Signale entlang der Strecke weitgehend entfallen. Ferner beabsichtigt man mit ETCS Level 2 eine weitere Kapazitätssteigerung der Strecke realisieren zu können.

Die Erfahrungen mit ETCS Level 2 auf den Bestandsstrecken sind aus technischer Sicht auch in der Schweiz durchgehend positiv (Sommer 2011, S. 7). Da es zuseitig, insbesondere für Güterzüge, keine Zugvollständigkeitssysteme (Train Integrity Management System) gibt, muss ETCS Level 2 weiterhin mit Gleisfreimeldesystemen geplant werden. Weiterhin sind die Blöcke auf den Strecken der SBB bereits optimiert, um eine höchst mögliche Streckenkapazität zu gewährleisten. Unter diesen Prämissen gibt es derzeit keine einheitliche Meinung, ob die Kapazität leicht ab- oder zunimmt. Weiterhin stellte man fest, dass die Investitionskosten der bisherigen Level 2 Installationen die Erwartungen deutlich überstiegen.

Da man auf Grundlage dieser Erkenntnisse noch deutliche Optimierungspotenziale bestehen, wurden Überlegungen angestellt, inwiefern, unter der Prämisse der Verwendung von ETCS und dem Einsatz möglichst weniger streckenseitiger Systeme, ein positiver Business Case dargestellt werden kann.

## 3 Die Ziele von RCA

Durch die Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines landesweiten Rollouts von ETCS Level 2 in der Schweiz entstand eine Diskussion innerhalb einiger europäischer Infrastrukturbetreiber inwieweit, durch die Weiterentwicklung und weitergehende Modularisierung und Standardisierung der Signaltechnik über ERTMS und EULYNX hinaus, die Wirtschaftlichkeit der Signaltechnik gesteigert



## Business Paper

werden kann. Aus diesen Überlegungen entstand die europäische Plattform zur Definition einer Referenzarchitektur für das Gesamtwerk Zugsteuerung und Zugsicherung (ZZS), im Englischen CCS (Command and Control System). Aus diesem Zusammenhang heraus wurde die Plattform RCA (Reference CCS Architecture) genannt (s. EUG 2018).

Die RCA-Plattform wird aktiv durch Infrastrukturbetreiber wie Network Rail (England)<sup>1</sup>, Deutsche Bahn (Deutschland)<sup>2</sup>, SBB (Schweiz)<sup>3</sup>, RFI (Italien), Infrabel (Belgien) und Trafikverket (Schweden) getragen, welche zum Teil eigene, nationale Programme zur Standardisierung und Modularisierung der Signaltechnik haben. Ferner wird die RCA-Plattform durch die Organisationen der EEIG ERTMS Users Group (EUG<sup>4</sup>) und EULYNX<sup>5</sup> unterstützt. Integraler Bestandteil von RCA sind die ERTMS- und EULYNX-Spezifikationen.

Die Ziele von RCA sind definiert (EUG 2018) und detailliert untersucht worden. Diese sind auf oberster Aggregationsebene:

- Lebenszykluskosten signaltechnischer Systeme senken;
- Kapazität auf der Schiene erhöhen;
- Verfügbarkeit des Gesamtsystems steigern;
- Schnelle Migration ermöglichen;
- Sicherheit erhöhen.

RCA bietet zukünftig klare und eindeutige Schnittstellendefinitionen für das gesamte signaltechnische System (CCS), die für den digitalisierten Eisenbahnbetrieb benötigt werden. Wie im White Paper (EUG 2018) der Plattform dargelegt, liefert RCA einen klaren Business Case (s. RCA.Doc.37, Concept: RCA effects overview, 2020 sowie detaillierter in RCA Concept Effects Business Case, 2020) und bietet Chancen mit heute verfügbaren Technologien den Bahnbetrieb höchst effizient zu gestalten. Am Beispiel der SBB wird in Abbildung 1 deutlich, dass die gesteckten Ziele von RCA erreichbar sind. Basis für diese Abbildung sind detaillierte Untersuchungen der SBB über einen Zeitraum von zwei Jahren.

---

<sup>1</sup> Weitere Informationen unter <https://www.networkrail.co.uk/running-the-railway/railway-upgrade-plan/digital-railway/> (accessed 26.02.2020)

<sup>2</sup> Weitere Informationen unter <https://www.digitale-schiene-deutschland.de/> (accessed 26.02.2020)

<sup>3</sup> Weitere Informationen unter <https://smartrail40.ch/> (accessed: 26.02.2020)

<sup>4</sup> Weitere Informationen unter: <https://www.ertms.be> (accessed 26.02.2020)

<sup>5</sup> Weitere Informationen unter <https://www.eulynx.eu> (accessed 26.02.2020)

## Business Paper

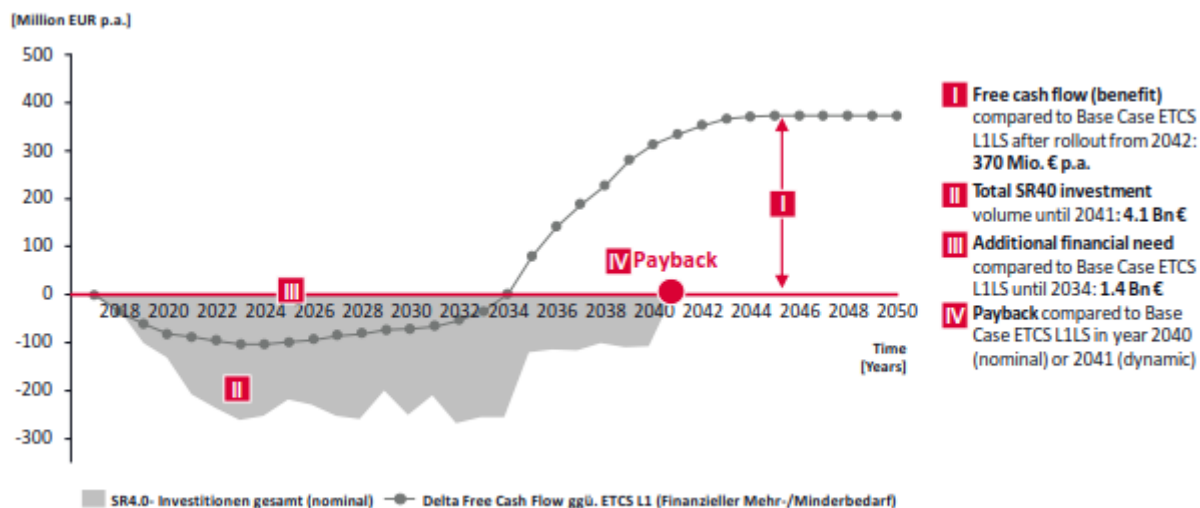


Abb.1 Business case am Beispiel der SBB

Quelle: [17], S. 20

Nach Untersuchungen auf dem kapazitativ optimierten Netz der SBB können mit RCA nochmals bis zu 20% Kapazitätsreserven generiert werden (s. RCA, Concept: Capacity Effects, 2020). Weitere Untersuchungen, welche die Erreichbarkeit der gesetzten Ziele substantiieren finden sich in der Veröffentlichung der RCA-Gamma-Dokumente<sup>6</sup>.

In diesem Artikel berichten wir über die Ergebnisse der Initiative mit Stand Januar 2020.

#### 4 Ableitung wichtiger technischer Bausteine / Notwendigkeit der Standardisierung des Gesamtsystems

Bei der Suche nach Technologien, mit Hilfe derer die Ziele von RCA umsetzbar sind, wurden alle bekannten und eingesetzten Technologien betrachtet. Die Analyse vorhandener Bahn-Technologien führte zu keinem Ergebnis. Daher wurden Überlegungen angestellt, inwiefern vorhandene Technologien und Prozesse aus anderen Industrien zu einem besseren Resultat führen können. Weiterhin wurde ein großes Optimierungspotenzial im System der Signaltechnik bezüglich der Standardisierung und Modularisierung des Systems offenbart. Der Grad der Standardisierung des Gesamtsystems hat direkte Auswirkungen auf das Kostenniveau des Gesamtsystems und ist daher der Schlüssel für Kostensenkungen über den gesamten Lebenszyklus. Gleichzeitig ermöglicht eine weitergehende Standardisierung die Verkürzung von Migrationszeiträumen und eine Erhöhung des Automatisierungsgrades.

Die Standardisierung des Gesamtsystems ist ferner die einzige Möglichkeit, die knappen Ressourcen im Bereich der Entwicklung signaltechnischer Systeme zielgerichtet einzusetzen und notwendige Innovationen zu forcieren.

<sup>6</sup> Online unter: <https://public.3.basecamp.com/p/bhfDv9ZV9TczMbXEEobA6rSC> (accessed 28.02.2020)

## Business Paper

Die Standardisierung durch ERTMS und EULYNX umfasst jedoch nur ca. 10% des Gesamtsystems. Der größte Teil der Signaltechnik wird durch herstellereigene Lösungen dominiert. Da nur ein geringer Teil der Standardisierung unterliegt, entstand in der Vergangenheit zwangsläufig eine große, fast nicht mehr beherrschbare Technologievielfalt über alle Teilsysteme der Signaltechnik. Eine weitergehende Standardisierung ist bedingt durch eine fehlende europäische Regulierung nicht möglich, da diese nicht im Interesse aller Marktteilnehmer liegt. Versuche, durch große Förderprogramme und europäische Projekte weitere Innovationen zu treiben und einer Standardisierung zuzuführen scheitern auch heute noch regelmäßig an der Notwendigkeit, Konsenslösungen zu finden sowie an der mangelnden Verbindlichkeit der Umsetzung von Innovationen.

Bei der Suche nach technologischen Lösungen, die dem heutigen Zielbild entsprechen, orientiert man sich zunächst an ETCS Level 3 und an CBTC-Systemen des urbanen Nahverkehrs. Somit lag es nahe, dass eine Optimierung des Systems mit Hilfe der exakten Position des Zuges und dessen Geschwindigkeit möglich ist. Mit der Übertragung des Ortes und der Geschwindigkeit vom Zug an eine streckenseitige Zentrale können Züge zentral und im Bremswegabstand zueinander gesteuert werden, sofern auf Gleisfreimeldung verzichtet werden kann. Dies stellt dann konsequenterweise die heutige, streng fahrstraßenorientierte, Logik in Frage. Züge können bedingt durch die Orientierung an Geschwindigkeit und Position unterschiedliche Bedarfe an Gleisbelegung generieren.

Ausgehend von diesen Überlegungen entstand über die letzten Jahre ein technologisches Zielbild, welches tatsächlich einen signifikant positiven Business Case für die sicherungstechnische Infrastruktur bietet (s. Schmidt 2019).

Im Folgenden werden die wichtigsten technologischen Bausteine skizziert. Diese technologischen Bausteine werden häufig als „Game Changer“ bezeichnet, da sie die Sicherungstechnik stark verändern. Der Begriff des Game Changer stammt aus einem Papier der Europäischen Eisenbahnagentur, ERA, in der die langfristige Entwicklungsperspektive für ERTMS beschrieben worden ist (ERA, 2015). Die in dem ERA-Papier beschriebenen „Game Changer“ sind durchaus deckungsgleich mit den sogenannten „Game Changer“ im RCA-Kontext. So umfasst RCA die Technologien wie FRMCS<sup>7</sup>, ETCS Level 3 oder auch ATO.

Bei Technologien, wie ETCS Level 3 und mobiler, sicherer Lokalisierung, wurden die dahinter liegenden Gedanken weiterentwickelt und die Konzepte bereits einem „Proof of concept“ zugeführt. Gleichzeitig sind die Technologien zu den fünf Oberzielen von RCA zugeordnet worden. Dies ist in Abb. 2 dargestellt.

---

<sup>7</sup> Future Railway Mobile Communication Systems

## Business Paper

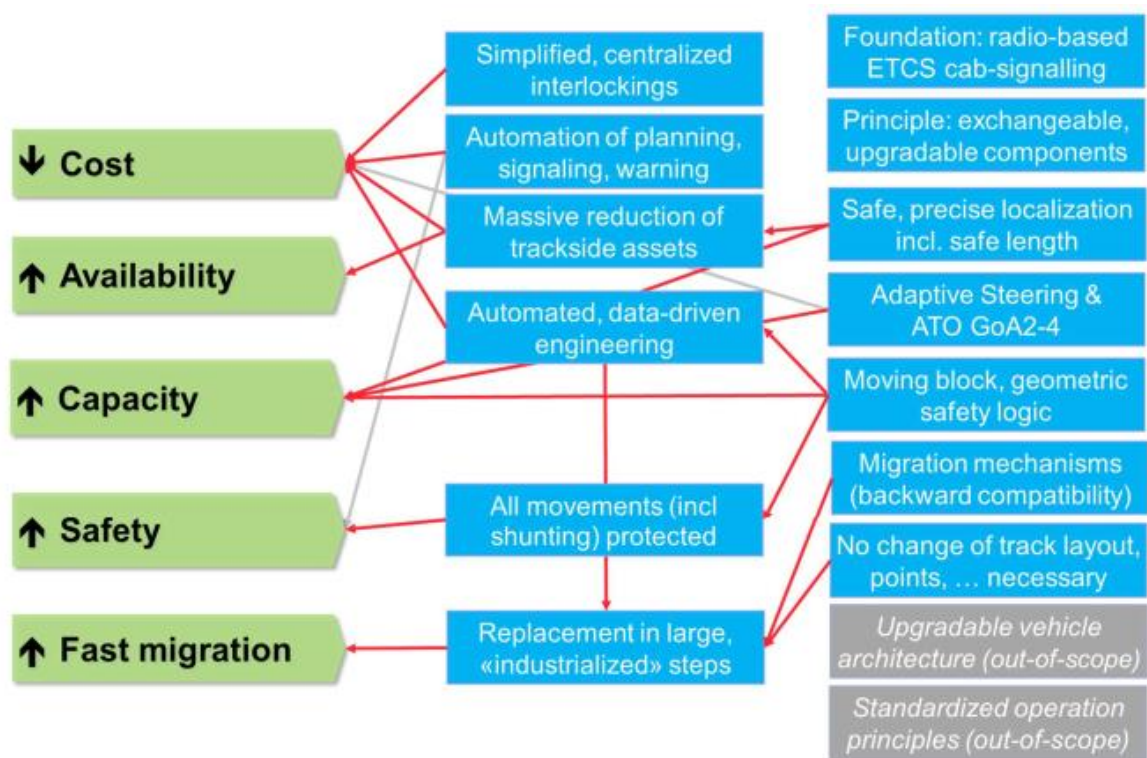


Abb. 2 Korrelation der Oberziele von RCA mit Technologien  
Quelle: [17], S. 4

Im Folgenden werden einzelne Innovationsfelder bzw. Technologien dargestellt, über die in der bisherigen Literatur weniger zu finden ist.

### 4.1 Mobile, sichere Ortung

Da die Bestimmung der Position des Zuges zum einen gleisgenau und zum anderen zu jedem Zeitpunkt korrekt sein muss, leitet sich die Anforderung nach einer signaltechnisch sicheren Ortung des Zuges ab. Eine Analyse über die Einstufung des Safety Integrity Level (SIL) hat noch nicht abschließend stattgefunden. Eine Einstufung im Bereich von SIL 4 ist jedoch sehr wahrscheinlich.

Die Übertragung der Geschwindigkeit wird zur Bestimmung der relativen Abstände der Züge benötigt. Diese Funktion darf als gegeben angenommen werden, da sie bereits heute in Level 2 und CBTC-Installationen realisiert ist. In Kombination mit Daten der sicheren Ortung können Abweichungen von der realen Geschwindigkeit besser korrigiert werden, wie sie heute z.B. durch Odometriefehler oder Fehleingaben beim Raddurchmesser auftreten.

Ein Konzeptpapier ist in der Veröffentlichung der RCA Gamma Dokumentation zu finden (RCA.Doc.29, Concept: LSL – Enhanced L3, Supervision, Localisation, 2020). Dieses Konzeptpapier geht über den Gedanken der Lokalisierung hinaus und stellt unter anderem den Nutzen von einer vollständigen Überwachung aller Fahrzeuge dar.

### 4.2 Geometrische Sicherungslogik und APS

Die Einstellung der Fahrstraßen und die Erteilung der Fahrerlaubnis (Movement Authority) erfolgt über die streckenseitigen Stellwerke. Durch das Stellwerk wird weiterhin die korrekte Endlage und der Verschluss von beweglichen Fahrwegelementen signaltechnisch sicher detektiert. Durch die Umstellung vom Fahren im Blockabstand hin zur Steuerung der Züge auf Grundlage der exakten Position und der Geschwindigkeit, können Einstellungen einer Fahrstraße wesentlich flexibler und basierend auf der aktuellen Gefährdung des zu schützenden Zuges vorgenommen werden. So können beispielsweise der Durchrutschweg bzw. die Sicherheitsmarge vor der Zugspitze bei abnehmender Geschwindigkeit des Zuges dynamisch reduziert werden. Gerade in Bahnhofsbereichen oder Bereichen in denen Zügen kreuzen oder einander überholen, kann mit spätest möglicher Festlegung einer Fahrstraße und der frühest möglichen Freigabe von belegten Gleissegmenten die Kapazität gesteigert werden. Für Fahrten, bei denen kein anderer Zug eine Gefährdung für die aktuelle Zugfahrt darstellt, kann z.B. auf Flankenschutz verzichtet und die Einstellung der Fahrstraße eventuell beschleunigt werden. In der derzeit veröffentlichten Architektur werden die Stellwerksfunktionen im sogenannten Advanced Protection System (APS) spezifiziert (s. Schmidt 2018).

Um dies zu erreichen, ist die block-bzw. abschnittsorientierte Fahrstraßenlogik durch eine Logik basierend auf der geografischen Position und der Geschwindigkeit der Züge zu ersetzen. Diese Stellwerkslogik wird in der RCA als geografische Stellwerkslogik bezeichnet. Ein ähnlicher Ansatz wird in anderen Forschungsansätzen verfolgt [z.B. Bachurina 2018, Döpmeier 2019].

Um hier auf Gleisfreimeldung gänzlich verzichten zu können, ist ein System zur Zugvollständigkeitserkennung, (Train Integrity Management System, TIMS), auf allen Zügen erforderlich. Für Personenzüge ist diese Technologie, aufgrund einer durchgehenden Datenleitung im Zug, entweder bereits implementiert oder kann mit geringem Aufwand nachgerüstet werden. Bei einer unzulässigen Zugtrennung wird diese durch das TIMS sofort offenbart. Für Güterzüge wird ebenfalls eine Lösung benötigt. Sollte die Mittelpufferkupplung in Europa in den nächsten Jahren eingeführt werden, dann wäre dieses Problem ebenfalls gelöst. Falls dies nicht der Fall sein wird, werden alternative Systeme zur Zugvollständigkeitserkennung benötigt. Unter Umständen könnte das Konzept Hybrid Level 3<sup>8</sup> zum Einsatz kommen, um einen Teil der benötigten kapazitiven und wirtschaftlichen Effekte zu heben und eine Migration zu erleichtern. Da bei dem Hybrid Level 3 Konzept die Gleisfreimeldung teilweise erhalten bleibt, kann weiterhin die mobile, sichere Ortung über einen längeren Zeitraum erprobt werden.

Um die Vorteile der Lokalisierung der geometrischen Sicherungslogik in allen Betriebssituationen nutzen zu können, müssen alle Fahrzeuge sicher geortet und stets von einer Streckenzentrale gesteuert werden. Hierunter fallen zum Beispiel Rangierbewegungen.

Als Voraussetzung für die Übertragung der Orts- und Geschwindigkeitsinformation sind Funknetze mit hoher Bandbreite und geringen Latenzzeiten erforderlich. Das bestehende GSM-R Netz reicht hierfür nicht mehr aus und befindet sich am Ende des Lebenszyklus. Die neue Funktechnologie FRMCS ist als Nachfolgegeneration von GSM-R für diese Anforderungen ausgelegt.

---

<sup>8</sup> Hybrid Level 3, z.B. Furness 2017

### 4.3 Automatic Train Operation und TMS

Automatisiertes Fahren (ATO) auf der Schiene wird insbesondere im urbanen Nahverkehr bereits seit Jahren praktiziert. Die Triebfeder für die Entwicklung von ATO lag in der benötigten Transportkapazität in Großräumen. Durch die gestiegenen Anforderungen an die Kapazitäten auf der Fernbahn (Mainline) wird die Einführung von ATO hier in den letzten Jahren diskutiert. Im Ergebnis lässt sich ein Trend zu teil-automatisiertem Zugbetrieb feststellen, bei dem nach wie vor ein Triebfahrzeugführer vorhanden ist, der jedoch im Regelfall nicht mehr selbst den Zug steuert. Brems- und Beschleunigungsvorgänge übernimmt die ATO-Steuerung. Die restlichen Aufgaben obliegen nach wie vor dem Triebfahrzeugführer. Dies entspricht dem Automatisierungsgrad GoA 2 (s. auch Leining, Lossau, 2019).

Eine Automatisierung der Zugfahrt darüber hinaus, hin zu einem Automatisierungsgrad GoA 3 oder GoA 4, treibt den Bedarf an technischen Systemen als Ersatz für menschliche Aufgaben in die Höhe.

Die Vorteile des automatisierten Zugbetriebes können bei einer Teilautomatisierung mit GoA 2 gehoben werden. Hierzu gehören insbesondere energieeffizientes Fahren sowie das Ausnutzen der Brems- und Beschleunigungsvorgänge zur Optimierung der Belegungszeiten.

Die Fahrerlaubnis kommt nach wie vor aus dem Stellwerk. Das Abfahren des Fahrbefehls wiederum wird von einem ATO-System gesteuert. Die Befehle für die Steuerung des Zuges erhält das ATO-System wiederum von einem Traffic Management System, welches die Züge in einem Bereich koordiniert. Dabei kann die Geschwindigkeit des Zuges nach betrieblicher Notwendigkeit innerhalb des zulässigen Bereiches variiert werden. Dies steigert die Betriebsflüssigkeit und somit die Kapazität der Strecke. Daher ist ATO GoA 2 ebenfalls ein erster Schritt des technischen Zielbildes von RCA. Die Spezifikation wird bereits heute auf GoA 4 vorbereitet, um eine Aufwärtskompatibilität sicherzustellen.

Die Arbeiten zur Konzeption eines zukünftigen Traffic Management Systems laufen gerade erst an. Als nicht-sicherheitskritisches System sind die Erwartungen in die Weiterentwicklungen in den nächsten Jahren hoch, insbesondere hinsichtlich der Implementierung von Künstlicher Intelligenz, welche nochmal einen Hub im Bereich der weiträumigen Konflikterkennung und -lösung bringen könnte.

### 4.4 Topologiedaten

Eine signaltechnisch sichere Ortung ist nur dann wirkungsvoll, wenn auch die zugrunde liegende Karte die Topologie sicher und exakt abbildet. Hierzu bedarf es einer sicheren Erstaufnahme der Topologie-Daten sowie einer ständigen Überprüfung der Topologie auf Änderungen.

Mit Hilfe dieser Topologie-Daten sollte sich auch die Projektierung der Infrastruktur vereinfachen.

## 5 RCA – die Referenzarchitektur des zukünftigen Standards

In einer Architektur werden Funktionen definierten Systemen zugeordnet. Die Systeme sind durch definierte Schnittstellen miteinander verbunden. Seitens eines Infrastrukturbetreibers besteht daher der Bedarf, eine Referenzarchitektur festzulegen, die zum einen die gewünschten ökonomischen und betrieblichen Effekte absichert, die zum anderen aber eine Migrationsfähigkeit von bestehender Infrastruktur in ein neues technologisches Zielbild sicherstellt.

Ein einheitliches Zielbild kann nur erreicht werden, wenn die signaltechnische Industrie Systeme gemäß der Referenzarchitektur entwickelt und die gesamte Infrastruktur eines Betreibers an einem einheitlichen Zielbild ausgerichtet ist.

## Business Paper

Aus diesem Grund wurde die Reference CCS Architecture entwickelt und abgestimmt. Diese ist in Abb. 3 dargestellt.

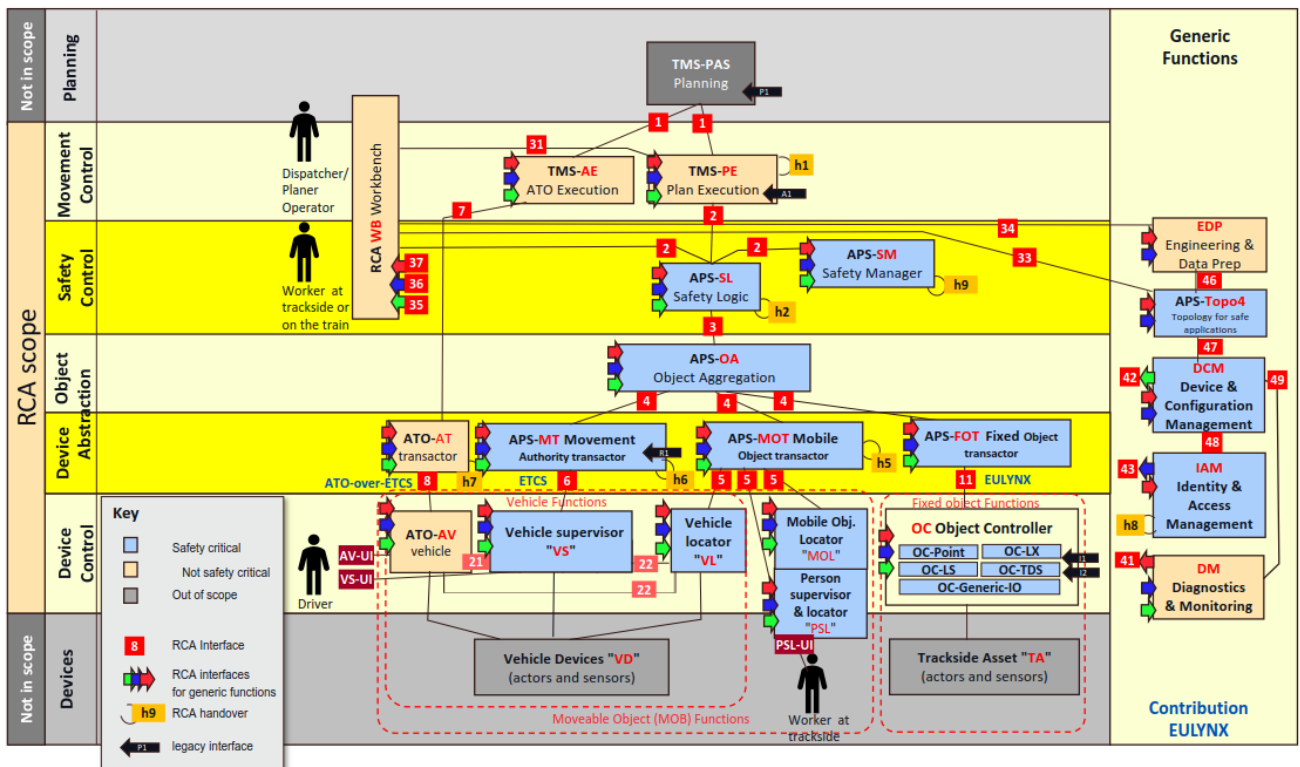


Abb. 3 Architektur Poster  
Quelle: [14], S. 2

## 6 On-Board CCS System und OCORA

Historisch gesehen wurde die Signaltechnik immer als System der Infrastruktur betrachtet. Die Zugsicherungssysteme der Fahrzeuge, welche entscheidend zur Sicherheit des Bahnverkehrs beitragen, wurden nur am Rande betrachtet.

Mit der Einführung von ERTMS rückten die fahrzeugseitigen signaltechnischen Systeme mehr in den Vordergrund der Betrachtung. Da die Spezifikationen sich stetig weiterentwickeln und die Software der On-Board-Geräte die Spezifikation gesamthaft und darüber hinaus immer gemäß dem aktuellen Stand abbilden müssen, entwickelten sich die ETCS On-Board-Geräte zunehmend zum Kostentreiber der Standardisierung. Die Notwendigkeit der Abbildung des aktuellen Standes der Spezifikationen ergibt sich durch die Umläufe der Fahrzeuge, die Strecken mit unterschiedlichen streckenseitigen Spezifikationsständen befahren. Durch die Abwärtskompatibilität der ETCS-Spezifikationen wird zwar die Interoperabilität der streckenseitigen Teilsysteme sichergestellt, dies bedarf aber eines ständigen Upgrades der Software der ETCS On-Board-Systeme.

Da es in jedem Land verschiedenste Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) gibt, jedoch meist nur einen Eisenbahninfrastrukturbetreiber für Hauptbahnen, unterscheidet sich der Markt für die CCS On-Board Systeme von jenem für die infrastrukturseitigen signaltechnischen Systeme. Die Stakeholder auf Fahrzeugseite unterscheiden sich signifikant von jenen der Infrastruktur. Hierdurch hat sich komplementär zu der Plattform RCA auch eine Plattform für die Standardisierung der signaltechnischen



## Business Paper

On-Board-Systeme mit dem Namen OCORA (Open CCS On-Board Reference Architecture)<sup>9</sup> entwickelt. Da ein signaltechnisches System nur als Gesamtheit der fahrzeug- und streckenseitigen Teilsysteme sicher funktioniert, arbeiten die Plattformen RCA und OCORA wo erforderlich zusammen.

### 7 Migration

Innovationen wurden im Bereich der Signaltechnik zumeist zögerlich und über lange Zeiträume im System Bahn eingeführt. Dies liegt zum einen am sicherheitlichen Design der Technik, welches einen großen Zeitraum für Dokumentation und Nachweisführung in Anspruch nimmt, aber auch an den erforderlichen Summen, die für eine netzweite Migration auf neue Technologie erforderlich sind.

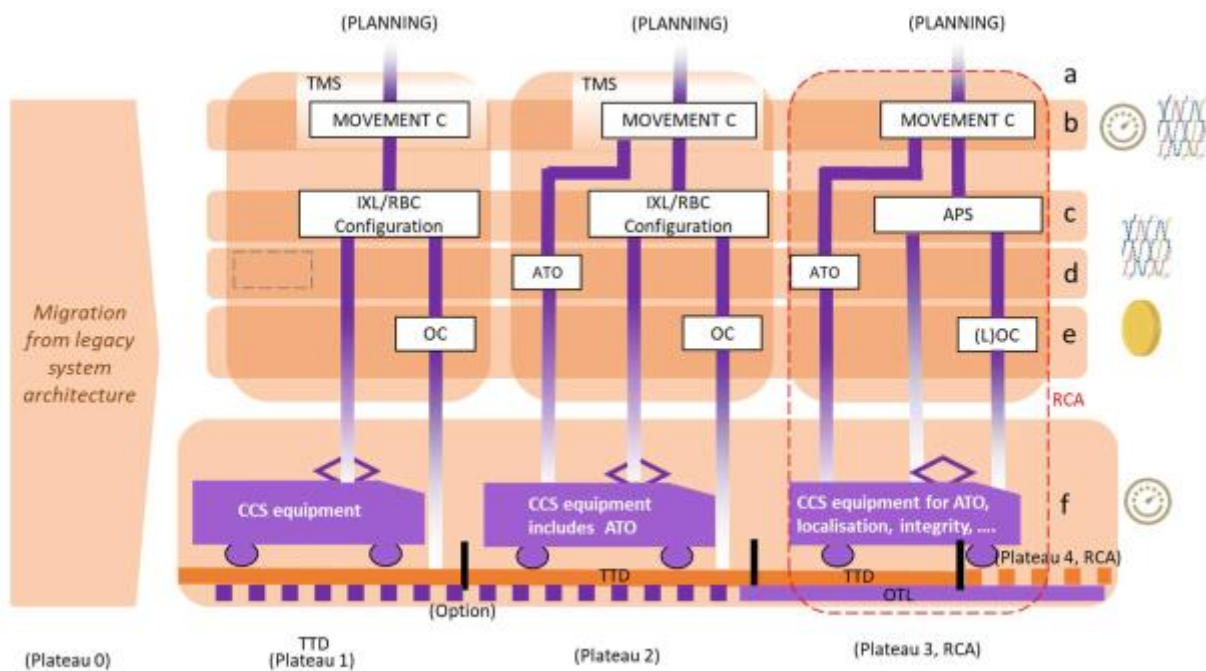


Abb. 4 Migration über mehrere Entwicklungsstufen (exemplarisch)

Quelle: [15], S. 2

Die Notwendigkeit einer vergleichsweise schnellen Migration auf eine neue, standardisierte Architektur gilt als unstrittig. Gleichzeitig ist es nicht möglich, im Sinne eines „big bang“ alle Systeme gleichzeitig auf die neue Referenzarchitektur umzustellen. Vielmehr wird es eine Migration über viele Projekte und mehrere Ausbaustufen geben. Die notwendigen Innovationen werden nach und nach über Pilotprojekte zu marktfähigen Produkten reifen. Daher ist die Referenzarchitektur als modulares System zu verstehen, in dem jedes Teilsystem die standardisierte Referenzarchitektur anwenden kann, aber nicht muss. Jeder Infrastrukturbetreiber hat unterschiedliche Ausgangsvoraussetzungen. Daher benötigt jeder Infrastrukturbetreiber einen eigenen Migrationspfad (RCA Migration, 2020).

<sup>9</sup> Weitergehende Informationen zu finden unter: <https://github.com/OCORA-Public/Publication> (accessed: 01.03.2020)



### 8 Weiterentwicklung von RCA

Mit der Entwicklung des architektonischen Zielbildes und der Bündelung der Kräfte der Bahnen wird die Notwendigkeit offensichtlich, die Innovationsgeschwindigkeit deutlich zu erhöhen und die Entwicklungskapazitäten zielgerichtet an den Innovationen arbeiten zu lassen. Hierzu wird es notwendig sein, analog zu ERTMS eine neutrale, europäische Institution mit Standardisierung der Gesamtarchitektur seitens der EU-Kommission zu mandatieren. Diese Institution wiederum sollte sich eines neutralen Systemintegrators bedienen, der die Standardisierung auf technischer Ebene überwacht und treibt.

Diese Aktivitäten sollten vollständig von der EU-Kommission finanziert werden. Darüber hinaus ist es zwingend notwendig, auch die Produktentwicklung durch die Hersteller und Pilotprojekte vollständig zu fördern. Jene Förderung, die heute in europäische Förderprogramme wie Shift-2-Rail (S2R) fließt, sollte zukünftig in Form einer Auftragsforschung und -entwicklung umgesteuert werden.

Eine Standardarchitektur setzt standardisierte betriebliche Prozesse voraus. Die Mitglieder der RCA-Plattform sind der Überzeugung, dass sich mit der schrittweisen Migration hin zur Standardarchitektur auch die betrieblichen Prozesse verändern. Diese Veränderung wird zu einer starken Harmonisierung der betrieblichen Prozesse in Europa über die Jahre hinweg führen. Diese Meinung wird nicht uneingeschränkt geteilt und ist Gegenstand der aktuellen Diskussion (RCA-UESC Joint Statement, 2020).

Im Gegensatz zur Position der Infrastrukturbetreiber wird die Harmonisierung der Betriebsprozesse in Europa, insbesondere von der herstellenden Industrie, als Voraussetzung für den Beginn der Migrationsphase gesehen. Bislang wurde dies von vielen Experten als nicht lösbare Aufgabe in Europa betrachtet (Pachl 2008, S. 37).

### 9 Ausblick

Die Entwicklung und Implementierung einer Referenzarchitektur und der dazugehörigen Produkte erscheint unter den heute bekannten Rahmenbedingungen unabdingbar. Der Business Case für RCA ist überzeugend und die technologische Umsetzung der Innovationen erscheint machbar. Die Entwicklungsaufwände hierfür sind immens und bedürfen einer Bündelung aller Ressourcen im Bahnsektor.

Die Umsetzung der Standards und die Umsetzungsgeschwindigkeit sind der Schlüssel zum Erfolg der Initiative. Dies kann nur gelingen, wenn die EU-Kommission bald die richtigen politischen Randbedingungen setzt und eine neutrale Institution mit der Umsetzung betraut, wesentliche Forschungsvorhaben auf die Ziele von RCA fokussiert und gleichzeitig die Entwicklung und Implementierung des Standards mit den erforderlichen Fördermitteln ausstattet.

Informationen zu den Initiativen sind über die im Quellenverzeichnis genannten Publikationen hinaus verfügbar unter [https://ertms.be/workgroups/ccs\\_architecture](https://ertms.be/workgroups/ccs_architecture) für RCA und unter <https://github.com/OCORA-Public/Publication> für OCORA.

### 10 Abkürzungsverzeichnis

APS	Advanced Protection System
CBTC	Communication Based Train Control
CCS	Command and Control System (s. auch ZZS)
EEIG	European Economic Interest Group
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ETCS	European Train Control System
ETM	ETCS Transmission Module
EUG	ERTMS Users Group
EULYNX	Europäische Organisation zur Definition von Standardschnittstellen
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
GoA	Grade of Automation
LS	Limited Supervision
OCORA	Open CCS On-Board Reference Architecture
RCA	Reference Control and Command System Architecture
SIL	Security Integrity Level
TIMS	Train Integrity Management System
TMS	Traffic Management System
S2R	Shift2Rail
ZZS	Zugsicherung- und Zugsteuerungssystem

### 11 Literaturverzeichnis

- [1] Bachurina, Daria, 2017: Untersuchungen zu einer neuen Generation der Bahnsicherungstechnik – Anforderungen und Technologie, Technische Universität Dresden, Dissertation 2018.
- [2] Behnsch, Reiner; Osburg, Jörg Peter; Schwarz, Detlef, 2011: Gemischtes ETCS-Ausrüstungskonzept für den Knoten Basel. In: *Signal&Draht* (2011), Nr. 12, S. 12-18.
- [3] BMVI, Kernergebnisse der Studie von McKinsey & Company für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur – Presseinformation vom 19.09.2018 [online]. Available at <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/machbarkeitsstudie-zukunft-bahn.pdf> (accessed 26.02.2020).
- [4] Döpmeier, Frederik ; Pejic, Miroslav ; Üyümez, Bilal (2019): Innovative Konzepte und Algorithmen für eine digitale LST (Teil 1); Smarte Sicherungslogik für das Stellwerk der nächsten Generation. In: *Deine Bahn*, 2019 (11/2019), S. 33-37. Bahn Fachverlag GmbH, ISSN 0948-7263, [Artikel].
- [5] EEIG ERTMS Users Group, 2018, [online]. Available at [https://ertms.be/sites/default/files/2018-07/16E0421C\\_HL3-clean.pdf](https://ertms.be/sites/default/files/2018-07/16E0421C_HL3-clean.pdf) (accessed 27.02.2020)
- [6] ERA: Report on ERTMS Longer Term Perspective, 2015, [online]. Available at [https://www.era.europa.eu/library/corporate-publications\\_en](https://www.era.europa.eu/library/corporate-publications_en) (accessed 27.02.2020).
- [7] EUG: EULYNX White Paper Reference CCS Architecture, 2018, [online]. Available at [https://ertms.be/sites/default/files/2018-09/18C044\\_1\\_White\\_Paper\\_Reference\\_CCS\\_Architecture.pdf](https://ertms.be/sites/default/files/2018-09/18C044_1_White_Paper_Reference_CCS_Architecture.pdf) (accessed 27.02.2020).
- [8] Furness, Nicola; van Houten, Henri; Arenas, Laura; Bartholomeus, Maarten, 2017, [online]. Available at EUG, EULYNX White Paper Reference CCS Architecture, 2018, [online]. Available at <https://irse.nl/resources/170314-ERTMS-L3-The-gamechanger-from-IRSE-News-Issue-232.pdf> (accessed 27.02.2020).
- [9] Ingenieurgesellschaft WSP Infrastructure Engineering GmbH; NEXTRAIL GmbH; quattron management consulting GmbH; VIA Consulting & Development GmbH; Railistics GmbH: Untersuchung: ETCS auf der Stammstrecke S-Bahn Stuttgart – Version 1.1 vom 16.05.2018.
- [10] Ingenieurgesellschaft WSP Infrastructure Engineering GmbH; NEXTRAIL GmbH; quattron management consulting GmbH; VIA Consulting & Development GmbH; Railistics GmbH: Untersuchung zur Einführung von ETCS im Kernnetz der S-Bahn Stuttgart – Abschlussbericht – Version 2.0 vom 31.01.2019, [online]. Available at [https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/Abschlussbericht\\_Untersuchung\\_ETCS\\_Stuttgart.pdf](https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/Abschlussbericht_Untersuchung_ETCS_Stuttgart.pdf) (accessed: 27.02.2020).
- [11] Leining, Michael; Lossau, Stefan, 2019, [online]. Available at <https://www.vde.com/resource/blob/1852602/5215286fead7b68d12bef9769cfdd3bc/4-1-lossau-leining-5g-praesentation-nextrail---quattron-public-data.pdf> (accessed 27.02.2020)
- [12] Pahl, Jörn: Die Bedeutung betrieblicher Regelwerke für die Leit- und Sicherungstechnik. In: *Signal&Draht* (2008), Nr. 12, S. 32-38.
- [13] RCA – UESC Joint Statement 2020, [online]. Available at <https://ertms.be/sites/default/files/2020-01/CCS%20A%20-%20joint%20statement%20%20V1.0.pdf> (accessed 27.02.2020).

## Business Paper

- [14] RCA Architecture Poster, 2020, [online]. Available at <https://public.3.basecamp.com/p/bhfDv9ZV9TczMbXEEobA6rSC> (accessed 27.02.2020).
- [15] RCA Migration, 2020, [online]. Available at <https://public.3.basecamp.com/p/bhfDv9ZV9TczMbXEEobA6rSC> (accessed 27.02.2020).
- [16] RCA. Concept: Capacity Effects, 2020, [online]. Available at <https://public.3.basecamp.com/p/bhfDv9ZV9TczMbXEEobA6rSC> (accessed 27.02.2020).
- [17] RCA. Concept: RCA effects - Business Case, 2020, [online]. Available at <https://public.3.basecamp.com/p/bhfDv9ZV9TczMbXEEobA6rSC> (accessed 27.02.2020).
- [18] RCA.Doc.29, Concept: LSL – Enhanced L3, Supervision, Localisation, 2020, [online]. Available at <https://public.3.basecamp.com/p/yc5xFvnXV8fe19kkEPDkQvjS> (accessed 27.02.2020).
- [19] RCA.Doc.37, Concept: RCA effects overview, 2020, [online]. Available at <https://public.3.basecamp.com/p/yc5xFvnXV8fe19kkEPDkQvjS> (accessed 27.02.2020).
- [20] Schmidt, Steffen: APS – Advanced Protection System, die günstige Einführung von ETCS Level 2/3. In: Signal&Draht (2019), Nr. 10, S. 22-31.
- [21] Sommer, Stefan; Schindelholz, Markus: Die Umsetzung der ETCS-Strategie in der Schweiz. In: Signal&Draht (2012), Nr. 9, S. 6-11.

Bernd Drapp<sup>1</sup>, Clemens Pohl

AP Sensing GmbH

### 1 Einleitung

Im vergangenen Jahrzehnt hat die ortsverteilte faseroptische akustische Sensorik (FOAS – Faseroptische Akustische Sensorik) unter Verwendung von Lichtwellenleitern in diversen Infrastrukturbereichen auf der ganzen Welt eine breite Akzeptanz gefunden [1]. Eine Vielzahl von Anwendungen – auch im Eisenbahnbereich – sind mittlerweile bekannt [2], [3]. Im Folgenden wird aufgezeigt, wie aus den Messdaten der FOAS-Technology neuartige, mehrskalige Mobilitätsinformation zur Zug- und Gleisüberwachung gewonnen werden können. Die Daten können, insbesondere im Hinblick auf Abweichungen vom Regelbetrieb einen zeitlich und räumlich aktuellen Beitrag für ein integriertes Betriebsmanagement liefern.

Gerade bei Abweichungen vom Regelbetrieb kommt es darauf an ein möglichst umfassendes Lagebild zu zeichnen auf dessen Basis dann weitere Entscheidungen getroffen werden können. Ein digitales Abbild der physischen Infrastruktur und der Bewegungen darauf eröffnet neue Möglichkeiten ein Lagebild zu visualisieren, die Situation zu bewerten und mit Hilfe zusätzlicher – auch Software gestützter Methoden- darauf zu reagieren. Die faseroptische Sensorik ist in der Lage räumlich und zeitlich kontinuierliche Informationen zur Position der Züge, ihrer Geschwindigkeit, Fahrtrichtung und Länge zu liefern.

Mit Hilfe dieser FOAS-Daten entsteht zunächst ein akustisches und dann digitales Abbild der Zuggewegungen im Schienennetz. Eingebettet in ein digitales Gesamtsystem, sind es diese Daten, die einen digitalen Zwilling des Schienennetzes permanent aktualisieren.

### 2 Messprinzip

Das Messprinzip der faseroptischen akustischen Sensorik (FOAS) beruht auf dem kohärenten Rayleigh Effekt in einer Glasfaser. Dazu wird ein Laserpuls in die Glasfaser eingekoppelt und das zurückgestreute Licht detektiert. Verändert sich die relative Lage der vom Laserpuls überstrichenen Streuzentren in der Glasfaser, so ändert sich die Intensität des Streulichts. Der Ort der Streuung wird mittels einer Laufzeitmessung ermittelt.

---

<sup>1</sup> Korrespondierender Autor: [bernd.drapp@apsensing.com](mailto:bernd.drapp@apsensing.com)

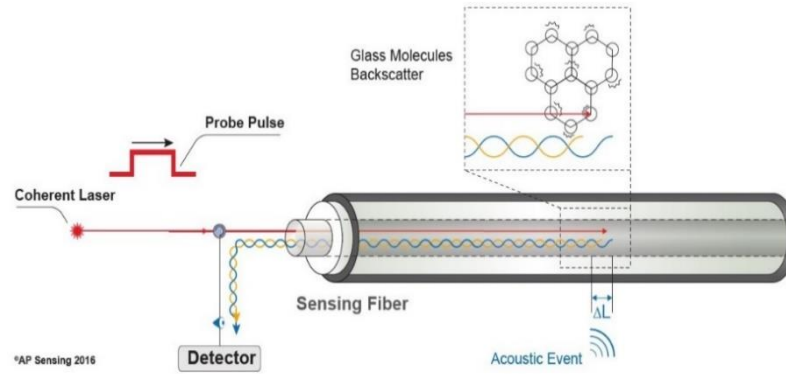


Abb. 1 Funktionsprinzip eines faseroptischen Akustiksensors basierend auf dem kohärenten Rayleigh Effekt

Vibrationen, die von außen auf die Glasfaser einwirken, verändern die Lage der Streuzentren zueinander und führen zu einer Intensitätsänderung der Rayleigh-Streuung. Wird nun die Streuung in der Glasfaser mit einer ausreichend hohen Laserpulsfolge abgefragt, fungiert die Glasfaser entlang ihrer Strecke als akustischer Sensor, ähnlich einer - über viele Kilometer - langen Kette von Mikrofonen (siehe Abb. 1). Ein Vorteil des FOAS Prinzips liegt darin, dass nur das in Rückwärtsrichtung gestreute Licht detektiert wird und somit nur ein Ende der Glasfaser mit dem Messgerät verbunden werden muss.



Abb. 2 Das schachtverlegte Glasfaserkabel entlang einer Bahnstrecke dient als Sensorkabel

Für die nachfolgend dargestellten Messungen wurden ungenutzte Glasfaseradern in bereits vorhandenen Glasfaserkabeln entlang verschiedener Bahnstrecken verwendet. Die Vergleichsmessungen zwischen einem FOAS Sensorsystem und konventionellen Achszählern wurden an der Strecke Fulda – Mottgers durchgeführt. Alle anderen Messungen wurden entlang verschiedener Strecken im Großraum Frankfurt und im Großraum Berlin durchgeführt. Bei allen Messungen waren die Glasfaserkabel in einem Schacht parallel zur Schiene verlegt (siehe Abb. 2).

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Lokalisierung von Zügen

Die Abb. 3 zeigt die FOAS typische Darstellung der akustischen Energie entlang der Glasfasermessstrecke im zeitlichen Verlauf. Auf der Abszisse ist der Abstand vom FOAS Messsystems entlang der Glasfaser dargestellt. Das Diagramm in Abb. 3 zeigt demnach ein akustisches Ereignis, das sich im zeitlichen Verlauf vom der Position 4200 m um 1200 m in Richtung auf das Messsystem zu

## Business Paper

bewegt. Die Länge des Zuges korreliert an jedem Ort mit der Dauer des akustischen Ereignisses und der Geschwindigkeit des Zuges.

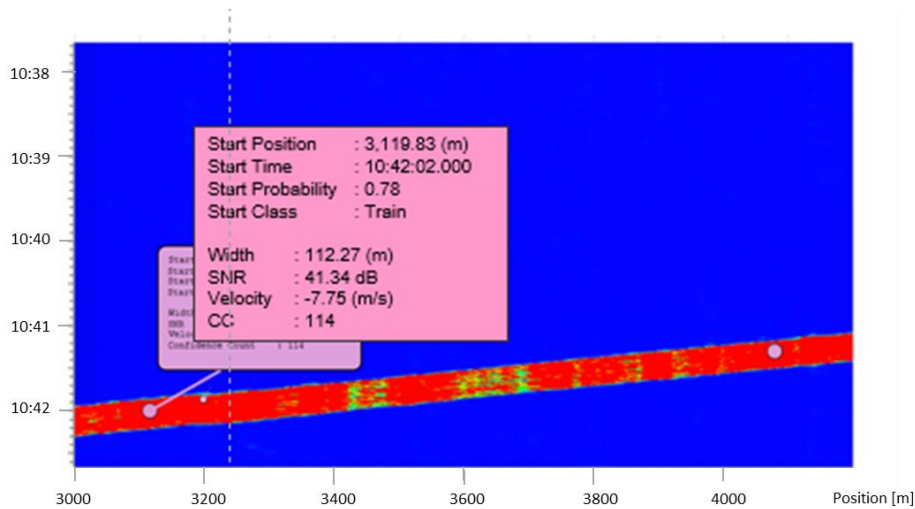


Abb. 3 Akustische Energie eines fahrenden Zuges eingekoppelt in die Glasfaser und mittels FOAS gemessen

Aus den gemessenen Daten lassen sich zu jedem Zeitpunkt die Position, die Geschwindigkeit, die Fahrtrichtung und die Länge des Zuges ermitteln. Entlang der Messstrecke Fulda – Mottgers sind ebenfalls konventionelle Achszähler verbaut, die zur strukturseitigen Geschwindigkeitsmessung herangezogen werden können. Abb. 4 zeigt die Korrelation der Geschwindigkeiten verschiedener Züge, die aus den FOAS Messung ermittelt wurden mit den Geschwindigkeiten, die aus den Achszählerdaten ermittelt wurden.

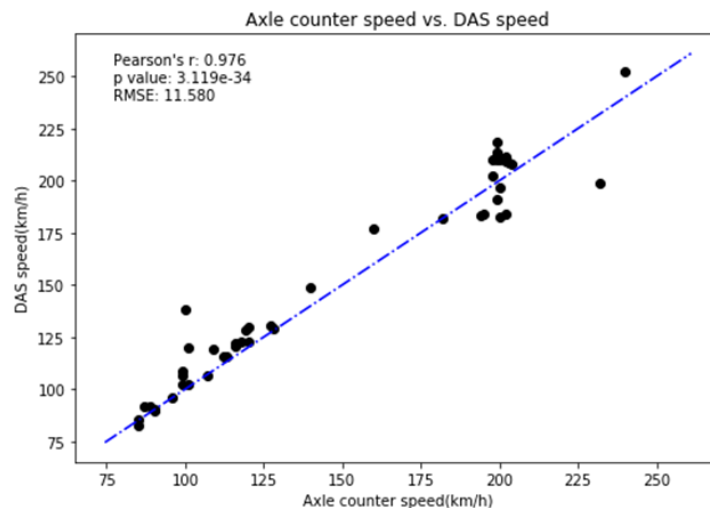


Abb. 4 Vergleich der Zuggeschwindigkeiten, die aus den FOAS Messungen ermittelt wurden, mit denen aus den Achszählerdaten

Der Korrelationskoeffizient zwischen den FOAS-Daten und den Achszählerdaten liegt mit  $R=0,976$  sehr hoch. Dies zeigt eine hohe Übereinstimmung der, aus den beiden unterschiedlichen Messsystemen, ermittelten Geschwindigkeiten.

In der Abb. 3 ist die akustische Energie eines Zuges auf der Strecke dargestellt. Die Glasfasermessstrecke reagiert als Kette von Mikrofonen und kann ohne Weiteres eine Vielzahl akustischer Ereignisse entlang der Messstrecke gleichzeitig detektieren und auswerten. Die Abb. 5 zeigt die akustischen Ereignisse



## Business Paper

mehrerer Züge entlang einer 12 km langen Teststrecke zwischen Offenbach und Frankfurt. Zur besseren Übersicht sind die Bahnhöfe entlang der Strecke mit vertikalen nummerierten Linien gekennzeichnet.

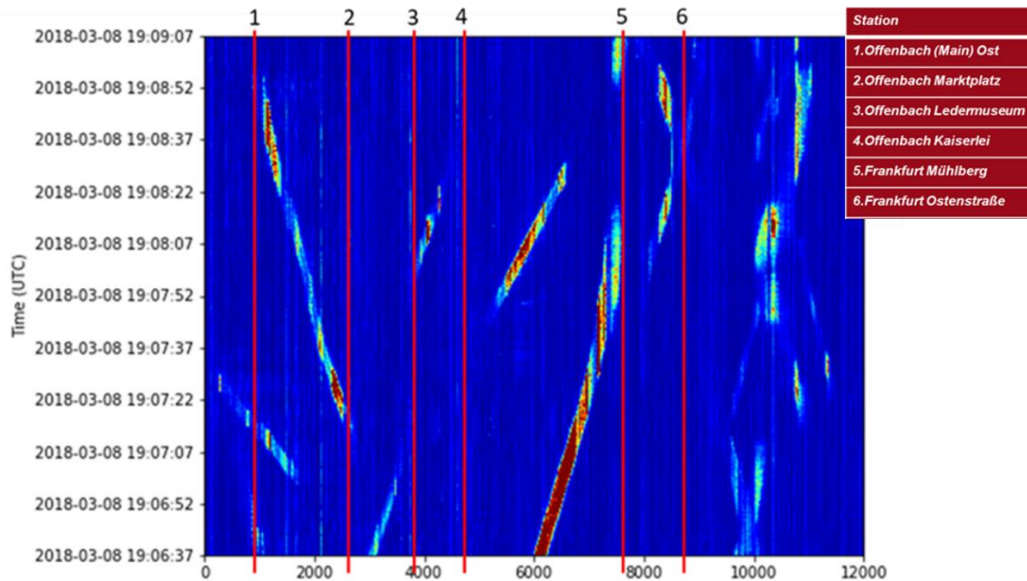


Abb. 5 Bildschirmdarstellung der akustischen Energie mehrerer unterschiedlicher Züge, die zeitgleich das Schienennetz befahren. Die senkrechten Linien markieren die verschiedenen Bahnhöfe entlang der Strecke von Offenbach nach Frankfurt.

Deutlich sind die unterschiedlichen Züge zu erkennen, die zur gleichen Zeit unterschiedliche Streckenabschnitte mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in unterschiedlicher Richtung befahren. Das Diagramm zeigt auch deutlich die Ein- und Ausfahrten sowie die Aufenthalte der Züge an den Bahnhöfen Frankfurt Mühlberg (s. 5) und Frankfurt Ostendstraße (s. 6).

In Abb. 3 sind die Züge jeweils mit Ihrer Position entlang der Sensorfaser dargestellt. Mit Hilfe der GPS-Koordinaten der Sensorfaser lassen sich die Züge auch auf einer interaktiven geographischen Karte darstellen (s. Abb. 6).



Abb. 6 Echtzeitdarstellung der akustischen Energie zweier Züge mit hinterlegter Landkarte.

Eine schnelle Datenverarbeitung sowie optimierte Erfassungs- und Auswertelgorithmen ermöglichen es auch mehrere schnell fahrende Züge gleichzeitig und in Echtzeit darzustellen. Damit ist der erste Schritt gemacht, um zu jeder Zeit und an jedem Ort ein aktuelles, akustisches, digitales Abbild der



Bahnstrecke und der darauf verkehrenden Züge zu erstellen. Dies wiederum ermöglicht es Abweichungen vom Regelbetrieb frühzeitig zu erkennen und darauf zu reagieren.

### 3.2 Entflechtung der Rad-Schiene Wechselwirkung

Die AP Sensing GmbH hat die FOAS-Technologie weiter entwickelt mit dem Ziel längere Sensorreichweiten bei gleichzeitig verbesserten Signalqualitäten zu erhalten. In konventionellen FOAS Systemen wird die Intensität der Rayleigh Streuung gemessen. Da diese Signale aber aus der kohärenten Überlagerung der Rayleigh-Streuzentren stammen, sind damit alle Nachteile eines Interferenzsignals verbunden (z.B. Nichtlineare Abhängigkeit der Messgrößen Intensität und Phase von außen auf die Sensorfaser einwirkenden Ausgangssignal). Darüber hinaus tritt in der Sensorfaser statistisch verteilt der Effekt des Signalfadings auf. Das bedeutet, dass es entlang der Sensorfaser immer wieder Stellen gibt, an denen das Signal zu Rauschverhältnis deutlich verschlechtert ist. Mit Hilfe einer optimierten optischen Architektur, bei der die Phaseninformation des Rayleigh-Streulichtes verwendet wird, gelingt es diese Effekte weitgehend zu minimieren.

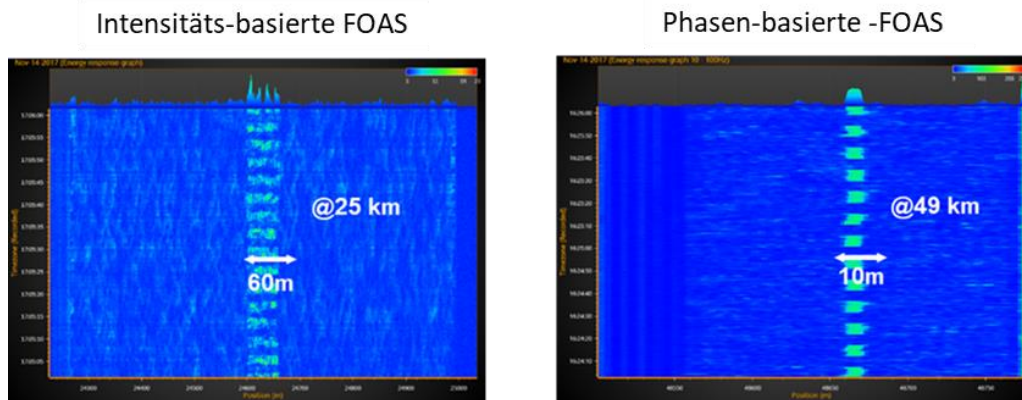


Abb. 7 Vergleich unterschiedlicher FOAS Messsysteme. Die Phasen-basierte FOAS Technologie zeigt eine deutlich bessere Auflösung des Signals, selbst in einer Entfernung von 49 km von der Detektionseinheit

In der Abb. 7 sind ein Vergleich der konventionellen intensitätsbasierten Technologie im Vergleich zur Phasen-basierten Technologie dargestellt. Deutlich ist das verbesserte Signal zu Rausch Verhältnis – auch bei einer nahezu doppelt so großen Entfernung von der Detektoreinheit - zu erkennen.

Durch die verbesserte Messtechnik gelingt es selbst geringe Variationen im akustischen Signal aufzunehmen. Die Abb. 8a zeigt das aufgenommene Signal eines vorbeifahrenden Zuges. Die Messdaten zeigen geringe Variationen, die durch den Überlauf der Drehgestelle verursacht wurden. Aus dem Signal lässt sich die Anzahl der Drehgestelle ermitteln; obwohl es sich um nur geringe Variationen auf einem sehr starken Signal handelt.

Die Abb. 8b und 8c zeigen mit der Sensorfaser aufgenommene und aus den Messwerten extrahierte Frequenzmuster. Mit der verfeinerten Messtechnik würden sich auch geringe Variationen im Frequenzgang identifizieren lassen, so dass sich die Messtechnik auch für eine Identifikation eines Materialschadens an der Infrastruktur oder am rollenden Material einsetzen lässt. Typische Frequenzen, die bei einer Zugüberfahrt durch die Rad-Schiene Wechselwirkung entstehen findet man beispielsweise in [4].

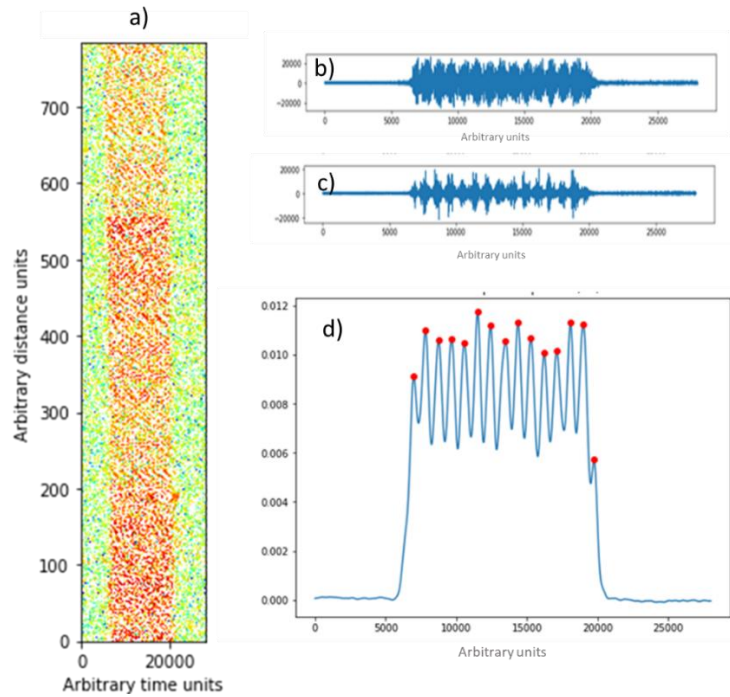


Abb. 8 Die empfindliche phasen-basierte FOAS Technologie ermöglicht es durch ausgeklügelte Datenverarbeitung aus der gemessenen akustischen Energie eines vorbeifahrenden Zuges die Anzahl der Achsdrehgestelle zu ermitteln

Die Wechselwirkungen zwischen Schiene und Rädern, die auftreten, wenn ein Zug über die Schiene fährt, beinhalten Informationen sowohl über den Zustand von Schienen als auch über den Zustand der Räder [5], [6]. In Abb. 9 ist das Signalmuster eines vorbeifahrenden Zuges wieder als diagonal verlaufendes Muster dargestellt. Die Wartung des rollenden Materials kann regelmäßig im Depot durchgeführt werden. Dagegen ist die Überprüfung der Infrastruktur zumeist nur vor Ort möglich und damit aufwendig und kostspielig. Eine Entflechtung der Einflüsse von Rad und Schiene auf das Messsignal ist vor dem Hintergrund einer vorausschauenden Instandhaltung der Infrastruktur von besonderem Interesse. Letztlich kann auch hier die FOAS Technologie einen Beitrag zu einer höheren Streckenverfügbarkeit beitragen.

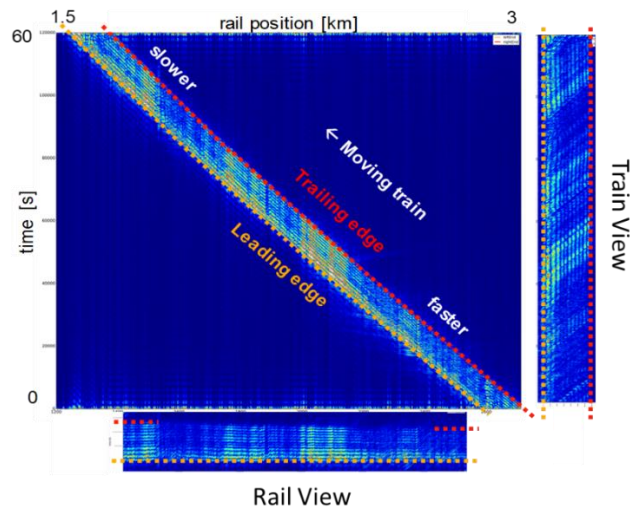


Abb. 9 Akustische Energie eines Zuges (a) und die Transformation in eine „Gleis zentrierte“ Darstellung (b)

In einer „Gleis zentrierten“ Sichtweise wird jede Gleisposition mit dem gleichen komplexen Stimulus Zug beaufschlagt, der über seine Länge in Frequenz und Amplitude variiert. Jedoch erfährt jeder Gleisabschnitt denselben komplexen Stimulus. Die Messungen an der Sensorfaser werden im Wesentlichen von 3 Beiträgen beeinflusst:

- Dem vom Zug emittierten Frequenzspektrum,
- Der akustische Zug-Gleis Kopplung,
- Der akustischen Übertragungsfunktion des Bodens (s. a. [7]).

In [7] ist gezeigt, dass der Einfluss eines einzelnen Zuges auf das gemessene und gemittelte Signalspektrum nur gering ist. Damit lassen sich sowohl räumliche als auch zeitliche Veränderungen der Infrastruktur aus der Wechselwirkung – auch mit unterschiedlichen – Zügen im Verlauf der über die Zeit detektieren. Somit gewinnt die Methode eine besondere Bedeutung für die Zustandsüberwachung der Infrastruktur. Wie bereits im vorherigen Abschnitt Zugverfolgung liefert die FOAS Technologie räumlich und zeitlich aktuelle Daten für ein digitales Abbild der Infrastruktur.

### 3.3 Lokalisierung kritische Angriffe auf die Infrastruktur

Ein weiterer Aspekt der Gleisüberwachung, die mit Hilfe der FOAS Technologie ermöglicht wird, ist das Erkennen und Lokalisieren von Kabeldiebstählen entlang der Gleisstrecke. Dadurch kann es zu Streckenausfällen aufgrund unterbrochener Signalleitungen kommen [8]. Die FOAS Technologie ermöglicht es einen Kabeldiebstahl zu lokalisieren und so zu einer schnellen Instandsetzung mit geringer Ausfallzeit beitragen. In den meisten Fällen werden Kupferkabel direkt aus dem Kabelschacht entlang der Bahntrasse gestohlen. Die Kabel werden durchtrennt und aus dem Schacht gezogen [9], [10]. Dabei kommt es zu Vibrationen direkt im Kabelschacht, die auf das Sensorkabel übertragen werden. Dieses Signal ist deutlich zu erkennen und zeigt ein charakteristisches Muster (siehe Abb. 10). Zu Beginn hat das durchtrennte Kabelstück eine bestimmte Länge, die im Verlauf der Aktion immer kürzer wird. Das beobachtbare Signal entspricht der Länge des noch im Schacht bewegten und noch zu entfernenden Kabelstücks. Zur Verdeutlichung ist in der Abb. 10 nur das Signal dargestellt, das direkt der Kabelentnahme zuzuordnen ist dargestellt. Nicht dargestellt sind die Signale, die durch vorbereitende

## Business Paper

Tätigkeiten wie beispielsweise das Anheben der Kabelschachtabdeckungen oder Personen auf dem Kabelschacht, hervorgerufen und detektiert wurden.

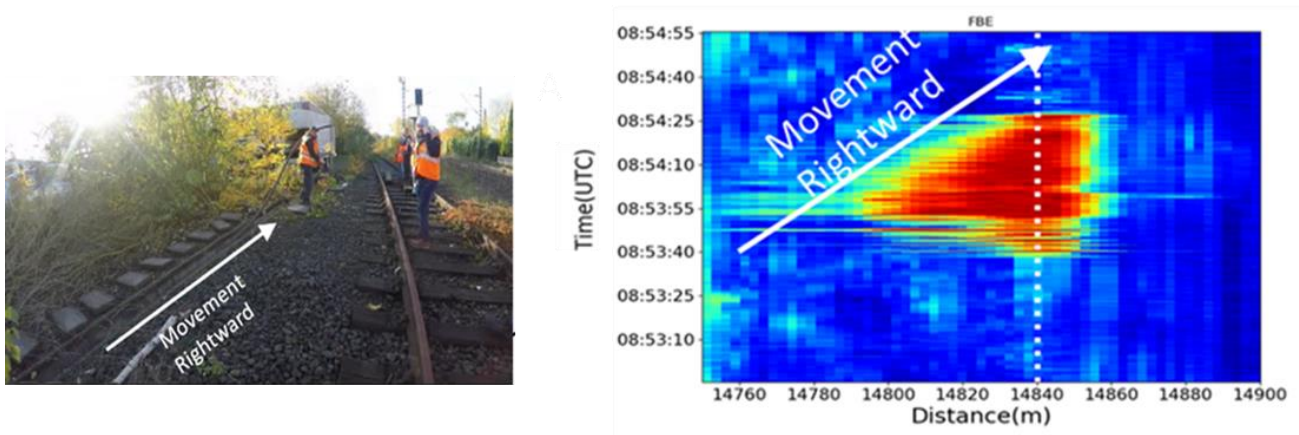


Abb. 10 Simulation eines Kabeldiebstahls (Foto links). FOAS Signal aufgrund eines Signalkabelzugs aus einem Kabelschacht (rechts)

Im laufenden Bahnbetrieb gilt es die unterschiedlichen Signalmuster für fahrende Züge, Gleisfehler oder Kabeldiebstahl gleichzeitig zu erkennen und dem Ereignis richtig zuzuordnen. Die gemessenen Signalmuster der Züge in Abb. 3 oder Abb. 5 oder das Signalmuster im Falle eines simulierten Kabeldiebstahls in Abb. 10 zeigen charakteristische Verläufe. Damit wird es möglich die unterschiedlichen Ereignisse mit anhand ihrer charakteristischen Signalmuster automatisch zu erkennen und einer Ereignisgruppe zuzuweisen.

In der Abb. 11 sind drei unterschiedliche akustische Ereignisse entlang der Bahnstrecke Berlin- Baruth dargestellt.

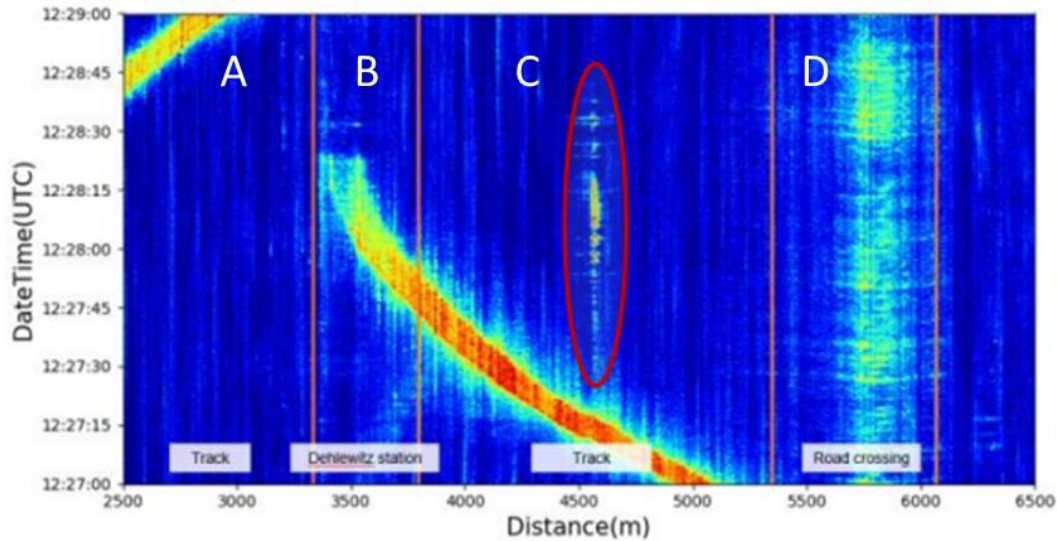


Abb. 11 Dargestellt sind einer Reihe verschiedener Ereignisse entlang der Bahnstrecke Berlin - Baruth. Das Signal, das auf einen simulierten Kabeldiebstahl hinweist (s. Markierung in Abschnitt C), unterscheidet sich deutlich von den akustischen Signalen eines vorbeifahrenden Zuges (B) und dem einer Straßenkreuzung (D)

Im Bildabschnitt B der Abb. 11 ist deutlich der Bahnhof Dahlewitz zu erkennen. Hier fährt um 12:07:30 Uhr ein Zug ein, verlangsamt seine Fahrt und hält. Zur gleichen Zeit wird 1 km entfernt in Richtung Rangsdorf ein Kabeldiebstahl simuliert (s. rote Markierung im Abschnitt C). Die Stelle wurde mit Bedacht gewählt, denn 1 km weiter überquert eine vielbefahrene Straßenbrücke der A 10 die Bahnstrecke (s. Abschnitt D). Alle drei Ereignisse fanden zur gleichen Zeit an unterschiedlichen Positionen entlang der Sensorfaser statt. Die FOAS Messsystem mit seinen besonders angepassten Algorithmen auf Basis des Maschinellen Lernen ist in der Lage alle drei gleichzeitigen Ereignisse zu erkennen und zu klassifizieren. Damit ist es möglich ein außergewöhnliches Ereignis wie einen Kabeldiebstahl automatisch und in Echtzeit zu erkennen und einen Alarm auszulösen.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Zug- und Gleisüberwachung mit faseroptischer Sensorik, speziell mittels der FOAS Technologie ist es möglich unterschiedliche Züge räumlich und zeitlich entlang ihres Fahrweges nahezu lückenlos zu überwachen. Die Messdaten beinhalten Echtzeitinformationen zur Zugposition, zur Zuggeschwindigkeit und über die Zuglänge. Die Daten bilden die Basis für einen infrastrukturseitigen, kontinuierlichen Zugintegritätsnachweises und ermöglichen damit eine Steigerung der Zugdichte durch das Fahren im wandernden Raumabstand (Moving Block).

Die faseroptische Überwachung der Gleisstrecke bietet durch die Entflechtung der akustischen Rad-Schiene Wechselwirkung die Möglichkeit, die im Betrieb auftretenden Veränderungen in den Messsignalen eindeutig dem rollenden Material oder der Infrastruktur zuzuordnen. Dies bildet die Basis für eine intelligente und vorausschauende Instandhaltung und leistet somit einen Beitrag zu einer erhöhten Streckenverfügbarkeit. Ein weiterer Beitrag zur Streckenverfügbarkeit ergibt sich durch die schnelle Erkennung und Lokalisierung von Kabeldiebstählen entlang der Trasse.

Die Zug- und Gleisüberwachung mit der faseroptischen Sensorik nutzt die bestehende Glasfaserinfrastruktur entlang der Bahnstrecke, um die akustischen Signale zu erfassen, zu digitalisieren



## Business Paper

und sie dann mit Hilfe intelligenter Algorithmen für verschiedenste Anwendungen nutzbar zu machen. Es ist vorstellbar, dass künftig die Gleisüberwachung mit faseroptischer Sensorik verstärkt genutzt wird um verschiedenste Mobilitätsinformationen und Infrastrukturdaten digital und in Echtzeit zur erfassen und sie – im Sinne einer digitalen Repräsentanz - auf unterschiedlichen Plattformen zur Verfügung zu stellen. Damit kann die faseroptische Sensorik einen wichtigen Beitrag leisten um, wie bei Abweichungen vom Regelbetrieb notwendig, ein digitales Lagebild zu vervollständigen und zu aktualisieren.

### 5 Acknowledgements

Die Autoren danken ihren Kollegen G. Cedilnik, C. Cantini, J. Malaprade, A. Pearce für ihre Unterstützung bei der Auswertung der Messdaten und M. Zarzycka für die Hilfe bei der Installation des FOAS Systems sowie M. Schubert und A. Lämmerhirt von der DB Netz AG, für den Zugang zur Infrastruktur.

### 6 Literaturverzeichnis

- [1] ASTM (2014). ASTM F3079-14, Standard Practice for Use of Distributed Optical Fiber Sensing Systems for Monitoring the Impact of Ground Movements During Tunnel and Utility Construction on Existing Underground Utilities, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [2] F. Peng, N. Duan, Y. J. Rao, J. Li, "Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive otdr", *Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 20, pp. 2055-2057, Oct. 2014.
- [3] A. V. Timofeev, "Monitoring the railways by means of c-otdr technology", *International Journal of Mechanical Aerospace Industrial and Mechatronics Engineering*, vol. 9, no. 5, 2015.
- [4] Connolly, D.P.; Kouroussis, G.; Laghrouche, O.; Ho, C.; Forde, M.C. Benchmarking railway vibrations—Track, vehicle, ground and building effects. *Constr. Build. Mater.* 2015, 92, 64–81.
- [5] Pombo, João & Ambrósio, Jorge & Silva, Miguel. (2007). A new wheel–rail contact model for railway dynamics. *Vehicle System Dynamics*. 45. 165-189.
- [6] Kalker, J. J. (1991) "Wheel-Rail Rolling Contact Theory", *Journal of Wear*, 144, pp. 243-261.
- [7] Gregor Cedilnik, Ryan Hunt, Gareth Lees, "Advances in Train and Rail Monitoring with DAS," in 26th International Conference on Optical Fiber Sensors, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018), paper ThE35.
- [8] House of Commons, Cable theft on the railway, HC 1609, Published on 26 January 2012 by authority of the House of Commons, UK.
- [9] Ian Mitchell, Cable Theft – an international perspective, IRSE NEWS | ISSUE 199 | APRIL 2014. UIC International unions of railways, Metal theft on the railways, UIC security platform, Paris, November 2013.

Alexandra Grefe<sup>1</sup>, Falk Trappmann<sup>2</sup>

SIGNON Deutschland GmbH

## 1 Einleitung

Es ist ein großes Ziel – in Europa und weltweit – die Kapazität und Qualität des Bahnbetriebs durch moderne Leit- und Sicherungstechnik zu erhöhen. Auch in Deutschland besteht ein hoher Modernisierungsbedarf. Nicht zuletzt soll damit ein großer Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden. Die übergeordnete Strategie, um diese Ziele zu erreichen, heißt „Digitalisierung“ [vgl. 1, S.8-9]. Ein wichtiger Grundstein für die Umsetzung dieser Strategie sind verlässliche Infrastrukturdaten in digitaler Form.

Dieser Grundstein ist in vielen Fällen noch nicht gelegt, da Informationen über den Bestand häufig nur in graphischer Form vorliegen. Einerseits ist die Konsistenz und Aktualität dieser Pläne problematisch, andererseits ist eine Integration solcher Daten in eine digitale Toolkette oder deren Bereitstellung für das Fahrzeug als digitaler Streckenatlas unmöglich.

Aktuelle maschinenlesbare Infrastrukturdaten sind also eine wichtige Voraussetzung für die Installation und Instandhaltung moderner Zugsicherungssysteme und damit für einen robusten Bahnbetrieb. Eine fehlende oder falsche Dokumentation der Bahnanlagen stellt einen Risikofaktor für jede Projektierung neuer Systeme dar. Deren Implementierung kann sich dadurch enorm verzögern und sehr kostenintensiv werden.

Eisenbahninfrastruktur ist außerdem nicht statisch, sondern verändert sich stetig durch Baumaßnahmen, Verschleiß oder die Installation neuer Technologien. Einmalig erfasste Informationen sind daher schnell veraltet und es muss ein Prozess für die kontinuierliche Datenaktualisierung etabliert werden.

Trotz dieser Notwendigkeit wird eine Aktualisierung der Infrastrukturdaten aufgrund des hohen wirtschaftlichen Aufwands häufig vernachlässigt. Wer aktuelle Daten braucht, greift in der Regel auf projektspezifische „Einmallslösungen“ zurück, auf die anderen Akteure keinen Zugriff haben oder die nicht mit anderen Datenformaten vereinbar und somit nicht weiterzuverwenden sind. Um dieses Problem zu lösen, sind innovative Ansätze gefragt, die den Aktualisierungsprozess beschleunigen und kostengünstiger machen.

Die Firma SIGNON hat für die kontinuierliche Datenerfassung das Mobile Mapping System SATengine entwickelt, welches auf der Auswertung georeferenzierter Videodaten basiert, die während einer Messfahrt im Regelbetrieb erstellt werden. Das System ist seit 15 Jahren erfolgreich im Einsatz und wird stetig weiterentwickelt. Um den steigenden Anforderungen an Qualität und Wirtschaftlichkeit gerecht zu werden, liegt der Fokus bei der Weiterentwicklung auf (Teil-) Automatisierung. Daraus ist in den vergangenen zwei Jahren hauptsächlich eine automatische Objekterkennung mittels Künstlicher Intelligenz (KI) entstanden. Da die Identifikation der Ausrüstungsobjekte in den Videos einen

---

<sup>1</sup> alexandra.grefe@signon-group.com

<sup>2</sup> falk.trappmann@signon-group.com



erheblichen Aufwand bedeutet, ist durch die KI-gestützte Objekterkennung ein großer Schritt in Richtung Zeit- und Kostenersparnis bei der Infrastrukturdaterstellung getan.

Darüber hinaus erschließen sich immer mehr Einsatzbereiche für die KI-basierte Analyse von Videodaten, von der Vegetationskontrolle über die Zustandsüberwachung der Infrastruktur bis hin zur Hindernisdetektion in Echtzeit. Die aufgenommenen Daten können somit zweit- und drittverwertet werden, wodurch die Wirtschaftlichkeit weiter erhöht wird.

## 2 Notwendigkeit aktueller Infrastrukturdaten für den Bahnbetrieb

### 2.1 Warum sind aktuelle digitale Daten nützlich

Nicht nur im Bereich der Eisenbahninfrastruktur kann eine aktuelle und konsistente Datenbasis viel Zeit und Aufwand sparen. Für den Betrieb, die Erneuerung oder die Instandhaltung von Bahnanlagen gilt das jedoch in besonderem Maße, da es sich um ein komplexes System großer Ausdehnung handelt, an dem viele Gewerke beteiligt sind. Für ein reibungsloses und sicheres Zusammenspiel dieser Gewerke ist es notwendig, dass alle auf dieselben, korrekten Daten zugreifen können. Im Zeitalter der Digitalisierung liegt die Vorstellung nahe, dass eine zentrale digitale Datenquelle bereits existiert, was allerdings häufig nicht der Fall ist. Ein Grund dafür ist, dass das Erstellen und Pflegen einer solchen „Datenbank“ ebenso kompliziert wie nützlich ist. Der Aufwand lohnt sich jedoch in vieler Hinsicht.

Zum einen liefern die Daten die Basis für die Erneuerung und Modernisierung der Bahninfrastruktur. Die Grundlage jeder Planung ist die Kenntnis des aktuellen Zustands. Weiterhin wird damit der Planungsprozess selbst erheblich vereinfacht, da die Daten in eine digitale Toolkette zur automatisierten Planung und Prüfung integriert werden können. Das Projekt PlanPro der DB Netz [2] legt dafür den Grundstein.

Nicht zuletzt hängt die Zukunft der Digitalen Schiene von einem Konzept zur Erstellung und Pflege digitaler hochgenauer Infrastrukturdaten und dessen Umsetzung ab: „Mit einer Kombination von digitalen Karten, Satellitenortung und Sensoren am Fahrzeug wird es künftig möglich sein, Züge in Echtzeit gleisgenau zu orten.“ [vgl. 1, S.7]. Hierzu sind gleisgenaue, digitale Karten notwendig, die bei Änderungen zeitnah aktualisiert werden.

### 2.2 Risiken veralteter oder inkonsistenter Daten

Unabhängig davon, in welcher Form die Daten im Einzelfall vorliegen, sind sie häufig unvollständig oder nicht korrekt. Bisher waren bestimmte Informationen, wie fahrwegbezogene Abstände zwischen Ausrüstungselementen auch nicht so relevant. Mit der Einführung von ETCS haben sich die Anforderungen jedoch grundlegend gewandelt. Welchen Weg ein Zug zwischen Daten- und Gefahrenpunkten zurücklegt, muss sehr genau bekannt sein.

In älteren Datenbeständen erfolgt die Positionsangabe von Ausrüstungselementen in der Regel über den Streckenkilometer. Diesen für die Berechnung von Distanzen heranzuziehen ist jedoch ausgeschlossen, da er sich nicht auf das einzelne Gleis bezieht und außerdem Sprünge aufweist. Erfolgt die Herleitung von Abständen aufgrund fehlender korrekter Informationen doch über den Streckenkilometer, birgt das ein enormes Fehlerpotential und stellt damit ein Sicherheitsrisiko dar.

Sehr wahrscheinlich werden solche Fehler im Rahmen von zahlreichen Prüfungen vor der Inbetriebnahme aufgedeckt. Eine Anpassung der Planung ist allerdings mit erheblichen Mehrkosten verbunden. Fällt der Projektierungsfehler erst nach der Installation auf, kommen unnötige

Umbaumaßnahmen hinzu. Im schlimmsten Fall blockieren solche Fehler eine Inbetriebnahme und erfordern die Weiternutzung veralteter Technik, was dem beschriebenen Ziel der Kapazitäts- und Qualitätssteigerung entgegensteht.

Das Risiko unnötig hoher Kosten und Verzögerungen besteht bereits in frühen Projektphasen. Inkonsistente Datenquellen veranlassen Hersteller von Zugsicherungssystemen dazu, eigene neue Daten zu erheben. Hierfür fallen jedes Mal hohe Ausgaben an, die häufig nicht eingeplant sind. Durch Synergieeffekte – eine zentrale Datenbank und einen Datenaustausch über standardisierte Formate und Schnittstellen – könnten die Kosten drastisch reduziert und an anderer Stelle sinnvoller verwendet werden.

### 2.3 Wieso ist es so schwer, die Daten aktuell zu halten

Die Risiken und Nachteile fehlerhafter Infrastrukturinformationen liegen auf der Hand. Welche Vorteile es mit sich bringt, in korrekte digitale Daten zu investieren, ebenfalls. Was ist also der Grund dafür, dass es in vielen Fällen trotzdem nur eine unzureichende Datenbasis gibt? Ein wesentlicher Faktor sind natürlich die Kosten. Allein die Erfassung der Bestandsdaten mit geeigneten Werkzeugen, die den heutigen Genauigkeitsanforderungen entsprechen, bringt einen erheblichen Aufwand mit sich. Von der Datenhaltung, die damit Hand in Hand gehen muss, ganz zu schweigen. Verglichen mit den Kosten für einen Kilometer ETCS-Ausrüstung und dem, was am Ende durch die zügige Erneuerung der Infrastruktur gespart werden kann, sind die Kosten jedoch verschwindend gering.

In wessen Verantwortung die Datenerfassung liegt und wer die Kosten dafür trägt, wird sehr unterschiedlich gehandhabt. Ist es im Interesse des Betreibers, eine exzellente Datenbasis für seine Infrastruktur bereitstellen zu können? Oder obliegt die Aufgabe der Datenbeschaffung demjenigen, der eine neue Ausrüstung auf die Strecke bringen soll? Diese ungeklärte Verantwortlichkeit stellt ebenfalls ein Hindernis auf dem Weg zum Ziel der allzeit verfügbaren aktuellen Daten dar.

Was die Datenaktualisierung wiederum so schwierig und teuer macht, ist das Nichtvorhandensein digitaler Daten und geeigneter Austauschformate. Hier befindet man sich quasi in einem Teufelskreis. Ist die Datenbasis erst einmal in digitaler Form vorhanden, kann ein Update viel einfacher und kostengünstiger erfolgen. Und auch genauer, da ein durchgängig digitaler Prozess weniger Fehlerquellen birgt. Voraussetzung hierfür ist die Einigung auf ein Datenmodell. Ein gewerkeübergreifender Datenaustausch kann nur stattfinden, wenn gemeinsame Grunddaten wie die Gleistopologie und -geometrie existieren. Analog zur projektspezifischen Datenerhebung führen digitale Insellösungen hier nicht zum Ziel.

Auch das Vertrauen in die Tools, mit denen die neuen Daten erstellt werden sollen, spielt eine große Rolle. Die bewährten Papierpläne abzulösen, bedeutet einen elementaren Wandel. Der Nutzer der Daten, wie auch immer seine Rolle aussieht, muss diesen akzeptieren.

### 3 Aktuelle Ansätze zur mobilen Erfassung von Eisenbahninfrastruktur

Je nach Einsatzzweck gibt es unterschiedliche Ansätze für die Erfassung von Bahninfrastruktur, die verschiedene Vor- und Nachteile mit sich bringen. An die Vermessung der Trassierung oder des Lichtraumprofils werden andere Anforderungen gestellt, als an die Erfassung von LST-Elementen entlang der Strecke und deren Zuordnung zum Gleisabschnitt. Da die Ausrüstungstechnik deutlich häufiger Veränderungen unterliegt als der Gleisverlauf, müssen diese Daten auch in kürzeren Abständen aktualisiert werden. Dafür sind die Anforderungen an die Messgenauigkeit nicht so hoch wie bei der Gleisvermessung, wodurch mehr Flexibilität in der Wahl der Messmethode besteht.

#### 3.1 Datenerfassung durch Befahrung

Für eine regelmäßige Datenerhebung eignen sich besonders mobile Messverfahren, die den Betrieb nicht stören. Dazu gehören Streckenbefahrungen mit angemessener Geschwindigkeit. Hierfür werden Schienenfahrzeuge mit der entsprechenden Messtechnik ausgestattet, die im normalen Betrieb mitfahren können und damit für die Aufnahme langer Strecken geeignet sind. Eine Gleissperrung ist nicht nötig, was ein erheblicher Zeit- und Kostenvorteil ist. Auch das Befahren von Tunneln ist mit dieser Methode problemlos möglich.

Durch die hohen Geschwindigkeiten, bei der solche Messungen durchgeführt werden können, bleibt der Zugverkehr ungestört und es wird wenig Zeit für die Datenerhebung benötigt. Allerdings bringen mobile Erfassungsmethoden Nachteile bei der Messgenauigkeit mit sich. Bereiche ohne GNSS-Empfang, wie Tunnel, überdachte Bahnhöfe oder Bergregionen, verstärken diesen Effekt. Um dem entgegenzuwirken, werden die Strecken mehrmals befahren und zusätzliche Informationen herangezogen, wie etwa die Wegimpulse des Fahrzeugs oder nachträglich Korrekturdaten.

Bei der Wahl der Aufnahmemethode gibt es mittlerweile zahlreiche Ansätze. Im Wesentlichen kann zwischen 2D Videoaufnahmen und 3D Laserscanning unterschieden werden, wobei beide Verfahren häufig kombiniert werden. Die Ausführungen reichen von kompakten Systemen, die die gesamte Sensorik in einer Box vereinen hin zu komplett flexiblen Mehrkamera-Systemen, die in jeder gewünschten Ausrichtung auf dem Fahrzeug installiert werden können.

Bei der Wahl der Aufnahmetechnik stellt sich neben den Basisanforderungen Genauigkeit, räumliche Auflösung und Perspektive auch die Frage, ob die Ergebnisse „nur“ für die Erstellung digitaler Infrastrukturdaten verwendet werden, oder gleichzeitig weitere Informationen liefern sollen, wie z.B. für die Vegetationskontrolle oder zur virtuellen Streckenbegehung.

#### 3.2 Datenerfassung durch Befliegung

Eine weitere Methode der Datenerfassung sind Luftaufnahmen. Diese bringen Vorteile z.B. bei der Vermessung von großen Bahnhöfen mit sich, da eine Befahrung aller Gleise dort sehr zeitaufwendig bzw. aufgrund von Abstellungen gar nicht möglich ist. Hier ist der Blick von oben eine effiziente Alternative. Zur Erfassung von Gleis und Umgebung wird dieselbe Technik eingesetzt wie bei der Befahrung – Drohne oder Flugzeug werden mit Kameras oder Laserscannern ausgestattet.

Das Überfliegen von Bahnanlagen ist allerdings durch die Gesetzgebung nicht uneingeschränkt möglich, was ein Nachteil dieser Methode ist. Außerdem müssen Tunnel oder andere aus der Luft unzugängliche Bereiche ausgespart werden. Für den Abgleich mit den Bestandsdaten ist eventuell eine zusätzliche Begehung der Anlage notwendig, da Details wie etwa die Bezeichnung von Signalen aus der Luft nicht zu erkennen sind.

## 4 Innovative Lösungen für eine regelmäßige Datenaktualisierung

Um den in Kapitel 2.2 beschriebenen Risiken aktiv entgegenzuwirken, sind innovative Lösungen gefragt, die zum einen die initialen Kosten für die Bestandsaufnahme reduzieren und im weiteren Verlauf einen regelmäßigen Abgleich in Form einer Delta-Analyse ermöglichen. Die vorgestellten Methoden zur Erfassung von Infrastruktur bergen verschiedene solcher Optimierungspotentiale.

Speziell für den Prozess der bahnspezifischen Infrastrukturerfassung und -analyse mit SATengine hat SIGNON solche Optimierungsmöglichkeiten identifiziert und für den produktiven Einsatz entwickelt. Diese werden in diesem Kapitel vorgestellt.

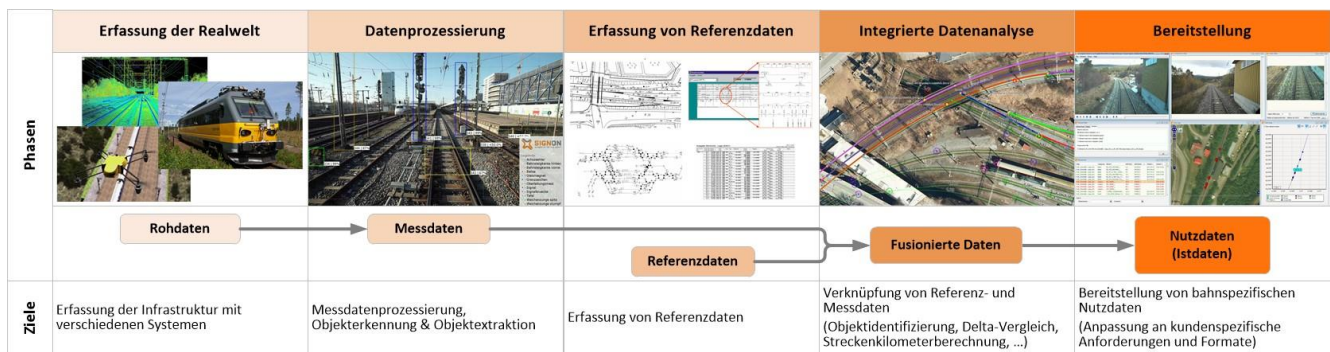


Abb. 1 SATengine Prozess zur Erfassung, Auswertung und Bereitstellung von Bahninfrastrukturdaten

### 4.1 SATengine-Prozess zur Erhebung von Bahninfrastrukturdaten

Unabhängig vom Aufnahmemedium und der Perspektive ist ein wesentlicher Aspekt der bahnspezifischen Datenerfassung die Referenz auf die geometrischen Gleis- und Streckenverläufe. Ohne diese sind die Daten nicht nutzbar und elementare Informationen, wie gleisbezogene Distanzen, können nicht ermittelt werden. Um sinnvolle Daten bereitzustellen, sind also neben der reinen Erfassung weitere Arbeitsschritte notwendig, die gut ineinandergreifen müssen. Um das Zusammenspiel dieser Arbeitsschritte im Hinblick auf die Datenqualität zu gewährleisten, hat SIGNON mit SATengine ein Tool und einen Gesamtprozess entwickelt, welcher auf die bahnspezifischen Anforderungen zugeschnitten ist (siehe Abbildung 1).

Die Datenerfassung erfolgt in der Regel durch eine Befahrung und Videovermessung (vgl. Kapitel 3.1). Je nach Zielstellung kann das System um einen Laserscanner erweitert werden, um 3D Punktwolken zu erzeugen. Auch aktuelle Luftbilder werden zunehmend als Datenquelle für die Auswertung herangezogen, um schlecht zu befahrende Bereiche wie große Abstellanlagen effizienter analysieren zu können. Detaillierte Informationen zu SATengine und der Datenaufbereitung können in [3] nachgelesen werden.

Welche Daten generell mit dem SATengine System erfasst werden können, ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Dazu gehören einerseits die geometrischen Gleisverläufe inklusive ihrer Gradienten. Hinzu kommen die geographischen Positionen aller sichtbaren Objekte der Ausrüstungstechnik, die durch bestimmte Attribute wie Name und Typ genauer beschrieben werden. Für den Anwendungsfall der Überprüfung von ETCS-Projektierungsdaten werden zusätzlich die Telegramme der Balisen ausgelesen.

Da vor allem der gleisgenaue Abstand der einzelnen Objekte zueinander eine wichtige Größe darstellt (vgl. Kapitel 2.2), erhält jedes Objekt eine topologische Referenz auf den Gleisabschnitt, zu dem es gehört. Ein geeignetes Topologiemodell ist daher essenziell, um die Infrastrukturdaten nutzbar zu machen. Es wird das Knoten-Kanten-Modell zur logischen Analyse der Gleisinfrastruktur herangezogen [vgl. 3, Kapitel 4.2].

Jeder Gleisabschnitt dient als lineares Referenzsystem, auf dem die zugehörigen Infrastrukturobjekte korrekt verortet werden können. Zusätzlich erhält jedes Objekt eine Referenz im Gesamtsystem – in der Regel ist dies der Streckenkilometer. Hiermit wird der Bezug zu anderen Datenquellen, wie zum Beispiel Plänen, hergestellt und ermöglicht einen Abgleich bzw. eine Aktualisierung. Wie bereits im Kapitel 2.2 erläutert, ist der Streckenkilometer zwar als Bezugssystem, jedoch nicht zur Berechnung von Distanzen geeignet.



Abb. 2 Übersicht der Bestandteile eines SATengine-Infrastrukturdatensatzes

### 4.2 KI-gestützte Objekterkennung

Um den Prozess der Messdatenauswertung zu beschleunigen, hat SIGNON in den letzten zwei Jahren die Objektextraktion mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz automatisiert. Gerade die Analyse von Erstbefahrungen ist sehr zeitaufwendig, vor allem, wenn die bisherige Datenlage lückenhaft ist. Hier können die Vorteile einer KI optimal eingesetzt werden.

Die KI-gestützte Objekterkennung basiert auf dem Einsatz tiefer künstlicher neuronaler Netze. Diese Technologie „ist Vorgängen im menschlichen Gehirn entlehnt. Die verwendeten Algorithmen lernen ähnlich wie ein neugeborener Mensch selbstständig, Objekte zu erkennen und Kategorien zuzuordnen.“ [vgl. 4, Kapitel 3.1] Die Funktionsweise von neuronalen Netzen zur Bildverarbeitung, sowie das zu Grunde liegende Forschungsprojekt zur verwendeten Software, werden in [4] ausführlich beschrieben.

Damit die neuronalen Netze die Objekte der Bahninfrastruktur zuverlässig erkennen, wurden diese im Vorfeld mit ausreichend großen Datensätzen von mehreren Tausend Bildern verschiedener bahnspezifischer Elemente (Signale, Balisen, Weichen, Bahnsteigkanten, etc.) trainiert. Je größer und diverser der Trainingsdatensatz ist, umso höher ist die spätere Genauigkeit der Objekterkennung. Ziel ist es, die relevanten Objekte mit einer höheren Zuverlässigkeit zu finden, als das menschliche Auge es kann - und das in einer viel kürzeren Zeit.



## Business Paper

Man muss sich jedoch der Tatsache bewusst sein, dass auch die maschinelle Verarbeitung des Videomaterials nicht zu 100% fehlerfrei ist. Um die Fehleranfälligkeit so weit wie möglich zu reduzieren, werden spezielle Filtermaßnahmen angewendet. Solche Filter sind u.a. Einschränkungen zur Position der vermeintlich erkannten Objekte im Bild. Beispielsweise wird eine Balise niemals außerhalb des Gleises vorhanden sein, sei die logische Erkennung auch noch so groß [vgl. 3, Kapitel 3.2].

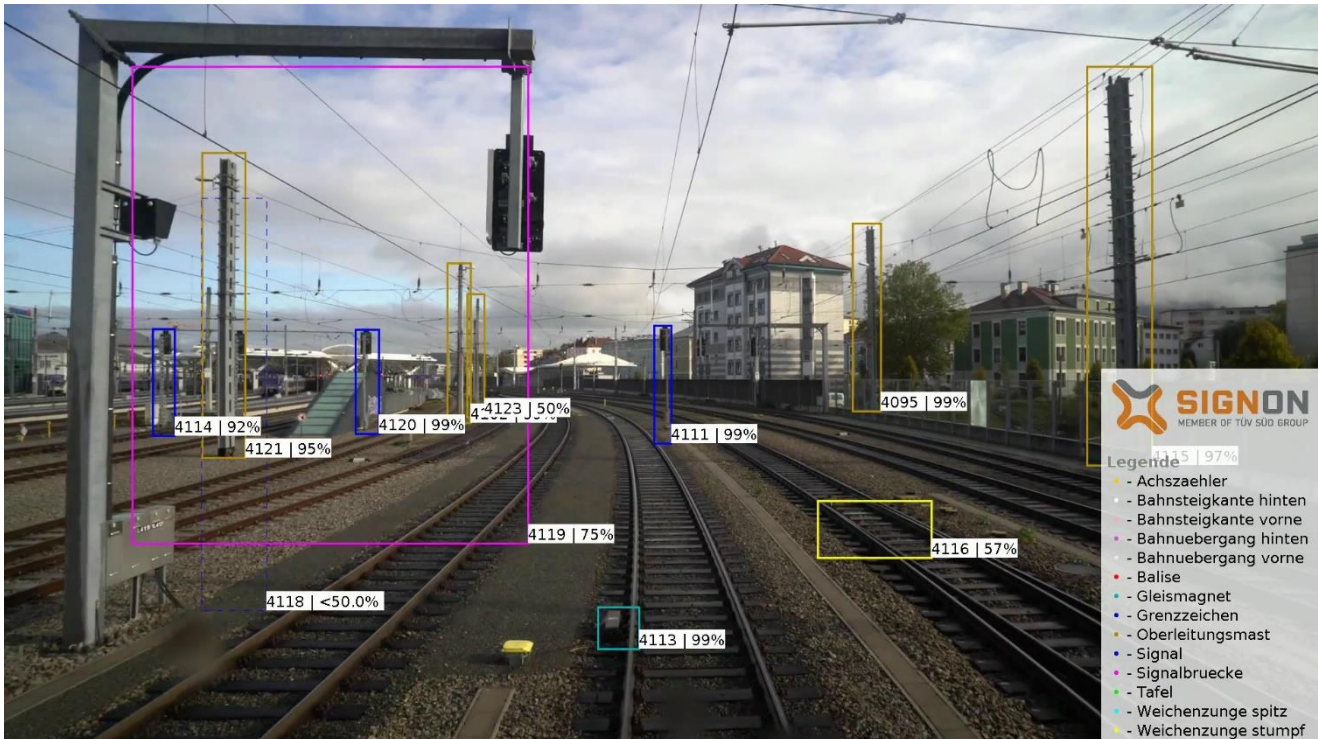


Abb. 3 SATengine Streckenvideo mit von der KI erkannten Elementen

Die auftretenden Fehler können in zwei Arten unterteilt werden, die nicht gleichzeitig reduziert werden können:

- Falscherkennung ( $f_F$ ) = Objekte werden erkannt, die es in Wahrheit nicht gibt
- Nichterkennung ( $f_N$ ) = Ein real existierendes Element wird nicht erkannt

Es muss anhand des Anwendungsfalls entschieden werden, auf welchen Fehler die Erkennung optimiert werden soll. Da der Einsatz der KI-gestützten Objekterkennung bei der Infrastrukturdatenerfassung den Input-Datensatz ersetzen soll und dabei eine Vollständigkeit angestrebt wird, ist es essenziell, dass alle real vorhanden Objekte gefunden werden. Die Nichterkennung ( $f_N$ ) muss also minimiert werden, womit man gleichzeitig höhere Falscherkennungen ( $f_F$ ) in Kauf nimmt.

Tab. 1: Beispiel zur Objekterkennung und deren Fehlerquoten

Quelle [4]

Element/ Kennzahl	Vorkommen	Erkennungen			Fehlerquoten	
		korrekt	falsch	übersehen	$f_F$	$f_N$
Balise	132	132	15	0	10,20%	0%
Gleismagnet	150	150	9	0	5,66%	0%
Signal	118	118	23	0	16,31%	0%
Signalbrücke	11	11	15	0	57,69%	0%
Weichenzunge	103	103	35	0	25,36%	0%
Tafel	203	199	125	4	38,58%	1,97%
Achszähler	133	124	2	9	1,59%	6,77%
Bahnsteig	24	22	28	2	56,00%	8,33%
Grenzzeichen	93	79	4	14	4,82%	15,05%
<b>Gesamt</b>	<b>967</b>	<b>938</b>	<b>256</b>	<b>29</b>	<b>21,44%</b>	<b>3,00%</b>

Dass dieses Ziel bereits für viele Infrastrukturelemente erreicht wird, ist in Tabelle 1 zu erkennen. Diese stellt Erkennungsraten und Fehlerquoten der KI-Analyse von SATengine Streckenvideos für die unterschiedlichen Elementtypen gegenüber. Es zeigt sich, dass für solche Objekte, die häufig vorkommen oder die wenig Varianz in ihrer Ausprägung besitzen, absolut zuverlässig gefunden werden. So liegt der Nichterkennungswert  $f_N$  für Balisen, Gleismagnete, Signale, Signalbrücken und Weichen bei 0%. Über alle bisher trainierten Elementtypen hinweg findet die Software bereits 97% der vorhandenen Objekte. Ein spezielles Beispiel stellt die Bahnsteigkante dar. Obwohl diese wenige Unterschiede in ihrer Erscheinungsform besitzt, wird sie häufig falsch erkannt. Das liegt an der Einfachheit ihrer Form, die leicht mit anderen Objekten zu verwechseln ist.

Dieses Ergebnis gilt es im Laufe der Zeit zu verbessern, indem das Modell mit weiteren Bildern trainiert wird. Auch ein Feedback-Prozess durch den produktiven Einsatz der Software hilft dabei, das Ergebnis weiter zu verfeinern. Gleichzeitig soll neben einer Fehlerreduktion das Modell erweitert werden auf bisher nicht trainierte Elementtypen oder andere Länder, in denen die Ausrüstungsobjekte möglicherweise andere Erscheinungsformen haben. Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Ausschnitt eines Streckenvideos aus Deutschland, welches von der KI-Software in ihrem aktuellen Entwicklungsstand analysiert wird.

Betrachtet man nun weiter den Prozess, gilt es im nächsten Schritt, die 21% der Objekte, die nicht zum realen Abbild der Infrastruktur gehören (vgl. Tabelle 1), zu verwerfen. Hierbei handelt es sich nicht um einen zusätzlichen Arbeitsschritt, der den Einsatz der KI durch erhöhten Zeitaufwand in Frage stellt. Um eine hohe Datenqualität sicherzustellen, wird auch bei der nicht-automatisierten Datenanalyse das Vier-Augenprinzip angewendet. Die KI ersetzt dabei nun die Erstanalyse, die anschließend durch einen Bahnexperten geprüft wird. Während dieser Prüfung werden die gefundenen Elemente bestätigt bzw. verworfen. Bei diesem Prozessschritt erhalten die extrahierten Objekte, die bisher lediglich eine zeitliche

## Business Paper

Referenz besitzen, gleichzeitig die erforderliche räumliche und topologische Zuordnung (vgl. Kapitel 4.1).

Ein weiteres Aufgabenfeld der automatischen Objekterkennung eröffnet sich im Bereich datenschutzrechtlicher Anforderungen. Durch das gezielte Training mit einem Personenmodell ist es möglich, schnell und zuverlässig Personen in Videos zu erkennen und unkenntlich zu machen.

### 4.3 Automatisierte Delta-Analyse

Ein großes Potential im Hinblick auf Kostensenkung und Effizienz ergibt sich durch den Einsatz für Delta-Vergleiche. Existiert bereits ein vollständig ausgewerteter Datensatz aus einer früheren Streckenbefahrung, können mit einer zeitlich versetzten Aufnahme, etwa nach baulichen Maßnahmen, automatische Analysen zu hinzugekommenen, entfernten oder veränderten Objekten erstellt werden.

In Kombination mit kleiner werdender Messtechnik mit vereinfachtem Bedien- und Installationsaufwand<sup>3</sup>, die permanent auf allen Strecken mitfahren kann, eröffnen sich Möglichkeiten für eine sehr engmaschige Aktualisierung der Infrastrukturdaten.

### 4.4 GIS Tool - „RailTopoGIS“

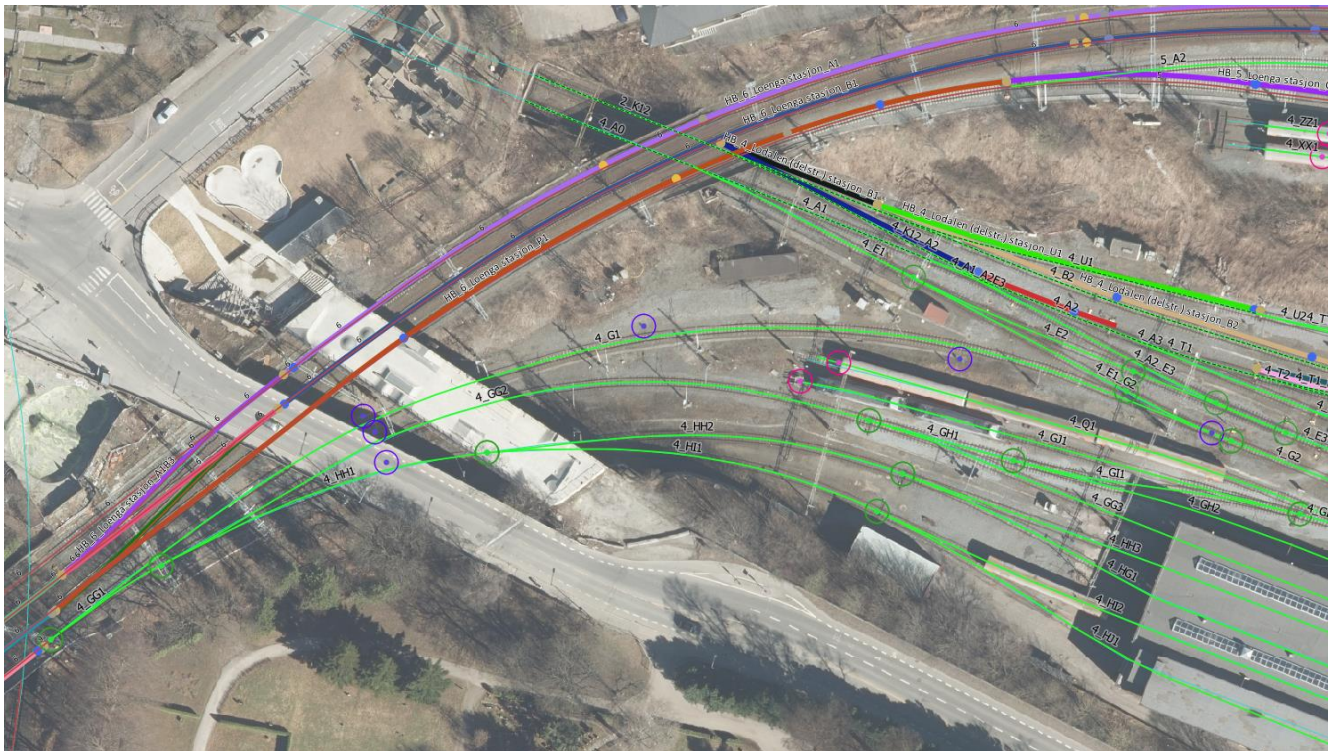


Abb. 4 RailTopoGIS, Beispiel einer Orthofoto-Analyse

Betrachtet man noch einmal den in Kapitel 4.1 dargestellten Prozess, ergeben sich nicht nur im Bereich der Objektextraktion Möglichkeiten der Effizienzsteigerung, sondern auch in der Phase 4, der bahnspezifischen Datenauswertung. Hier geht es zum einen um die Verbesserung des Prozesses, aber

<sup>3</sup> SIGNON arbeitet hierzu an einer Lösung mit Smartphones, die alle notwendige Sensorik in sich vereinen



auch um eine zusätzliche Nutzerfreundlichkeit durch visuell aufbereitete Daten. Um diese beiden Ziele zu verfolgen, hat SIGNON ein GIS-Tool entwickelt. Das auf der Open Source Anwendung QGIS basierende RailTopoGIS stellt verschiedene zusätzliche Anwendungen bereit [vgl. 5, Kapitel 5.2].

Wie zuvor erwähnt, spielt speziell die lineare Positionierung von Objekten für die Distanzermittlung eine große Rolle. Gleichzeitig möchte der Nutzer seine Objekte anhand bekannter linearer Referenzen, wie z.B. den Streckenkilometer, betrachten und bearbeiten. RailTopoGIS bietet daher die Möglichkeit zur Umwandlung von Geokoordinaten in lineare Referenzen und umgekehrt. Gleisbezogene Abstände können ebenfalls vermessen werden.

Weiterhin bietet das Tool eine sehr gute visuelle Unterstützung der bereits erwähnten Delta-Vergleiche. Unterschiede zweier zeitlich versetzter Abbilder derselben Infrastruktur werden für den Nutzer grafisch aufbereitet dargestellt. Für Infrastrukturobjekte deren Position sich verschoben hat, wird sofort der Deltawert ersichtlich.

Auch zum manuellen Editieren von Infrastrukturdaten bietet RailTopoGIS die nötigen Werkzeuge. Damit ist unter anderem der Grundstein für das Einbeziehen von Orthofotos in die Datenanalyse gelegt, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Für Bereiche, die durch eine Befahrung per Lok schwer erfassbar sind (z.B. Abstellanlagen), bietet das Hinzuziehen weiterer Erfassungsmethoden und Datenquellen ein enormes Potential zur Effizienzsteigerung.

## 5 Fazit und Ausblick

In diesem Artikel wurde dargelegt, weshalb aktuelle, digitale Infrastrukturdaten wichtig für den Bahnbetrieb und dessen Modernisierung sind. Dabei wurde das Thema „Digitalisierung“ in den Fokus gerückt, da in dieser Strategie eine Chance für die Erhöhung von Qualität und Kapazität des Schienenverkehrs liegt.

Dass eine einheitliche Datenbasis inklusive entsprechender Datenmodelle und geeigneter Austauschformate bisher nicht existiert, hat einen negativen Einfluss auf den Zeitplan von Modernisierungsprojekten und treibt deren Kosten in die Höhe. Wird auf eine Erhebung aktueller Daten verzichtet, riskiert man Projektierungsfehler, welche die Inbetriebnahme neuer Technologien verzögern oder gar verhindern. Die Gründe, weshalb dennoch auf eine kontinuierliche Datenaktualisierung verzichtet wird, sind vorrangig in dem hohen Aufwand und den daraus resultierenden Kosten zu suchen.

Ein Konzept für die permanente Verfügbarkeit aktueller Daten, damit solche Risiken ausgeschlossen werden können, ist somit zwingend notwendig, um bei der Modernisierung schnell voranzukommen. SIGNON hat mit SATengine ein bereits etabliertes Tool im Einsatz, um hochgenaue Infrastrukturdaten für diesen Zweck bereitzustellen. Der Prozess der Datenerhebung und -analyse wurde auf Optimierungspotentiale untersucht und daraufhin entschieden, eine automatische Objekterkennung zu entwickeln.

Die KI-gestützte Objekterkennung wurde zur Praxisreife gebracht und wird mittlerweile in Kundenprojekten produktiv eingesetzt. Hiermit ist ein großer Schritt getan, Betreibern von Bahninfrastruktur eine regelmäßige Datenpflege zu ermöglichen. Zur weiteren Unterstützung des Prozesses wurde das GIS-Tool RailTopoGIS entwickelt, welches die Weiterverwendung der Daten erheblich erleichtert und das Einbeziehen weiterer Datenquellen in den Aktualisierungsprozess ermöglicht.

## **Business Paper**

Neben der dringenden Notwendigkeit, aktuelle und konsistente Infrastrukturdaten für den digitalen Wandel im Bahnbetrieb bereitzustellen, ergeben sich viele weitere kurzfristige und langfristige Vorteile aus der Verwendung dieser Daten. Ein durchgängig digitaler Planungsprozess ist zum Beispiel einer davon. Um diesen zu unterstützen hat SIGNON die Bereitstellung der Daten im PlanPro-Format auf der Roadmap.

Des Weiteren können aktuelle Befahrungsvideos Vor-Ort-Begehungen ersetzen und so sinnvoll für Wartungszwecke eingesetzt werden. Nicht zuletzt wird auch der Abgleich von Projektierungsdaten mit der nach dem Bau tatsächlich vorzufindende Infrastruktur erheblich erleichtert, wenn digitale Werkzeuge eingesetzt werden können. Damit könnte in Zukunft der Abnahmeprozess beschleunigt werden.

### 6 Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Bahn AG: Digitale Schiene Deutschland.; [online]. Verfügbar unter: <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/1173510/0d975c55e4c4a312bb1f090e0aaf2a87/Broschuere-Digitale-Schiene-data.pdf> (13.02.2020)
- [2] Maschek, U.; Klaus, C.; Gerke, C.; Uminski, V.; Girke, K.-J.: PlanPro: Durchgängige elektronische Datenhaltung im ESTW-Planungsprozess; In: SIGNAL+DRAHT (2012), 9, S. 22-26
- [3] Hintze, P.; Prüter, F.: „Im Plan steht aber ein anderer Kilometer!“ – Das Potenzial georeferenzierter Bahninfrastrukturdaten; In: SIGNAL+DRAHT (2018), 11, S. 6-15
- [4] Genc, C.; Harmsen, F.; Köhler, T.: Automatisierte Erkennung von Infrastrukturelementen mit neuronalen Netzen; In: SIGNAL+DRAHT (2018), 9, S. 48-55
- [5] Harmsen, F., Hintze, P.; Elstner, J.: „Was, Wo, Wann, Warum? – Die automatisierte Erfassung von Bahninfrastruktur“; In: SIGNAL+DRAHT (2019), 12, S. 51-61