

# Integration von CBTC-Systemen in Schienenfahrzeuge

Weltweit erfordert die zunehmende Verkehrsnachfrage leistungsfähige automatisierte Schienenverkehrssysteme. Dazu werden teilweise neue Linien und Fahrzeugflotten benötigt. Alternativ wird bestehende Leit- und Sicherungstechnik erneuert und die korrespondierenden Einrichtungen werden in den vorhandenen Fahrzeugen ergänzt. Dieser Beitrag beschreibt die bei der Integration von neuen Signalsystemen in Fahrzeugen zu berücksichtigenden Aspekte.



Communications-Based Train Control (CBTC) ist in der Ausrüstung leistungsfähiger Schienenverkehrssysteme mittlerweile weltweit der anerkannte Stand der Technik. CBTC-Systeme unterstützen entsprechend IEC 62290 (siehe [1]) automatische Betriebsarten mit Fahrer an Bord (GoA2) bis zum Fahrer-/Begleiterlosen Betrieb (GoA4). Ein wichtiges Leistungsmerkmal von CBTC-Systemen ist die Möglichkeit des Einsatzes des „Moving-Blocks“, um die Zugfolge verdichten zu können. Auch in Deutschland ist in Bestandsnetzen wie Hamburg (Linien U2 und U4) und Frankfurt am Main (gesamtes Stadtbahnnetz) eine Ablösung konventioneller Zugsicherungsanlagen mit halbautomatischen CBTC-Systemen konkret geplant. Die Ausrüstung – insbesondere bestehender Fahrzeuge – stellt hierbei neben der Gestaltung des strecken- und fahrzeugseitigen CBTC-Gesamtsystems eine besondere Anforderung an die Schnittstelle zwischen dem Hersteller der signaltechnischen Systeme auf der einen Seite und dem Fahrzeughersteller dar. Die Vorgehensweise zur Ausrüstung der Fahrzeuge erfolgt hierbei in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten, die nachfolgend skizziert werden. Hierbei ist der Betrieb der Fahrzeuge über den gesamten Lebenszyklus hinweg mit zu betrachten.

rungsanlagen mit halbautomatischen CBTC-Systemen konkret geplant. Die Ausrüstung – insbesondere bestehender Fahrzeuge – stellt hierbei neben der Gestaltung des strecken- und fahrzeugseitigen CBTC-Gesamtsystems eine besondere Anforderung an die Schnittstelle zwischen dem Hersteller der signaltechnischen Systeme auf der einen Seite und dem Fahrzeughersteller dar. Die Vorgehensweise zur Ausrüstung der Fahrzeuge erfolgt hierbei in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten, die nachfolgend skizziert werden. Hierbei ist der Betrieb der Fahrzeuge über den gesamten Lebenszyklus hinweg mit zu betrachten.



**PD Dr.-Ing. habil. Lars Schnieder**

Geschäftsführer der ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH in Braunschweig. Er ist bei Technischen Aufsichtsbehörden anerkannter Sachverständiger für Zugsicherungsanlagen nach BOSTrab.

[lars.schnieder@ese.de](mailto:lars.schnieder@ese.de)



**Dipl.-Ing. Rainer David**

Ingenieurtechnische Beratung Elektrotechnik für Schienenfahrzeuge Nahverkehr

[IBRD.David@t-online.de](mailto:IBRD.David@t-online.de)



**Harald Fraisl, M. Sc.**

Projektleiter fahrerlose U-Bahn Linie U5 Siemens Mobility Austria GmbH

[harald.fraisl@siemens.com](mailto:harald.fraisl@siemens.com)



**1:** Ab 2024 werden die „X-Wagen“ auf der neuen Linie U5 in Wien vollautomatisch betrieben

Quelle: Siemens AG

## 1. Konzepterstellung

In der Phase der Konzepterstellung müssen u. a. Aspekte der betrieblichen, mechanischen und elektrischen Integration sowie der Abstimmung von Fahrzeugparametern zwischen Fahrzeugbauer und CBTC-Hersteller betrachtet werden. Diese Aspekte werden nachfolgend beschrieben:

### 1.1. Betriebliche Integration (Use Cases)

Ausgangspunkt einer Konzepterstellung ist immer die Erstellung eines Betriebskon-

zepts. Hierbei muss – ausgehend von der betrachteten Automatisierungsstufe – dezidiert betrachtet werden, wie der Baukasten eines CBTC-Systems in der Betriebsabwicklung konkret angewendet werden soll. Zu betrachtende Aspekte sind hierbei unter anderem die Aufnahme in und die Entlassung aus verschiedenen Automatisierungsgraden sowie die Führung des Fahrzeugs in verschiedenen Betriebsarten (mit korrespondierenden Überwachungsfunktionen). Wesentlich ist – gerade bei einem Betrieb in GoA4 – insbesondere der betriebliche Ablauf bei technischen Störungen sowie Notfall- und Rettungskonzepte. Die verschiedenen Use-Cases müssen in den folgenden Integrationsschritten hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die konkreten technischen Eigenschaften des CBTC-Systems betrachtet werden.

## 1.2. Mechanische Integration

Gemeinsam mit dem Lieferanten des CBTC-Systems und der mit dem Umbau beauftragten Firma wird die Positionierung der erforderlichen CBTC-Komponenten an und in den Fahrzeugen festgelegt. Hierbei sind vor allem die folgenden Komponenten in das Fahrzeug zu integrieren:

- *Gefäß (Geräteschrank/Geräteschränke oder Unterflurcontainer) für die zentralen und im Zugverband redundanten Recheneinheiten.* Baugruppenträger für die sicherheitsrelevanten Funktionen des Zugbeeinflussungssystems (Automatic Train Protection, ATP), für Funktionen der nicht sicheren Fahrzeugsteuerung einschließlich der automatisierten Fahr-/Bremssteuerung und der automatischen Türsteuerung (Automatic Train Operation, ATO) sowie den Steckerfeldern für die Übernahme und Übergabe weiterer Signale von und zur Fahrzeugsteuerung zur Übernahme weiterer Automatisierungsfunktionen für höhere Automatisierungsgrade (bspw. Auf- und Abrüsten des Fahrzeugs).
- *Konventionelle Schaltungstechnik zur Anpassung der Einzelsignale zwischen Zugsicherungssystem und Fahrzeug.* Fahrzeugsignale müssen aus Sicherheitsgründen oft für das Zugsicherungssystem aufgearbeitet werden (Wandlung in 2-kanalige Signale). Signale die vom Zugsicherungssystem ausgegeben werden, können oft die Fahrzeugkomponenten nicht direkt ansteuern. Daher sind Verstärkerschütze erforderlich.
- *Komponenten für die Kommunikation mit der Streckenausrüstung.* Hierbei müssen Fahrzeugantennen unter dem Fahrzeug für das Auslesen von Transpondern für die Synchronisation der Weg- und Geschwindigkeitsmessung positioniert werden. Dafür sind produktspezifische Besonderheiten, wie ausreichende eisenfreie Bereiche um die Antenne zu berücksichtigen. Des Weiteren müssen Antennen für die kontinuierliche, bidirektionale Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Strecke im Dachbereich vorgesehen werden. Ein wichtiges Kriterium für den Anschluss von Antennen sind die zulässigen maximalen Leitungslängen hin zu den entsprechenden Rechnerkomponenten sowie die Dämpfung durch Verbindungselemente.
- *Komponenten zur direkten Weg- und Geschwindigkeitsmessung.* Hierbei kann es sich je nach dem Odometriekonzept des jeweiligen Herstellers um verschiedene technische Komponenten handeln. Bei Wegimpulsgebern müssen freie Achslagerdeckel idealerweise nicht gebremster oder nicht angetriebener Achsen im Zugverband identifiziert werden. Auch die Verwendung eines gemeinsamen Polrads mit anderen Wegimpulsgebern der Fahrzeugsteuerung ist möglich. Die Radarsensoren sind so anzuordnen, dass die Radarkegel sich ungestört ausbreiten und Reflexionen vom Untergrund ungestört empfangen werden können. Auch für möglicherweise eingesetzte Beschleunigungsgeber gibt es zu berücksichtigende Randbedingungen bei der Positionierung im Fahrzeug.
- *Komponenten des Datenbusnetzwerks des Zugsicherungssystems.* CBTC-Systeme besitzen ein eigenes, von der Fahrzeugsteuerung unabhängiges Datenbusnetzwerk (meist Ethernet). Eine wichtige Komponente im Datenbusnetzwerk des CBTC-Systems ist ein Modem für die Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Strecke, welches wegen der zulässigen Leitungslängen zu den Antennen nicht im Bereich der zentralen Recheneinheit untergebracht werden kann. Hinzu kommen abhängig von der Fahrzeugkonfiguration diverse Switches z.B. zur Signalverstärkung.
- *Bedien- und Anzeigeelemente.* Selbst Fahrzeuge, die hauptsächlich im Fahrer-/Begleiterlosen Betrieb betrieben werden sollen, benötigen zusätzliche Bedien- und Anzeigeelemente im Fahrerstand für das Zugsicherungssystem. Beispiele hierfür sind die Displays, Taster und Störschalter.

Diese sind gemäß den Vorgaben einschlägiger technischer Regelwerke auf dem Führerstand anzuordnen (vgl. [2] und [3]).

Mechanische Integration bedeutet hierbei, dass die betreffenden Komponenten in einer Art und Weise befestigt werden müssen, so dass sie dauerhaft den dynamischen Beanspruchungen des Bahnbetriebs standhalten. Außerdem dürfen durch die Befestigungen keine sicherheitsrelevanten Bauteile (z.B. Drehgestelle) in ihrer Substanz geschwächt werden. Bei Nachrüstungen ist zu berücksichtigen, dass durch zusätzliche Komponenten für ein Zugsicherungssystem die zulässige Achslast nicht überschritten wird.

## 1.3. Elektrische Integration

Allgemein ist das CBTC-System in die vorhandene Fahrzeugsteuerung zu integrieren. Hierbei muss bei Bestandsfahrzeugen die bestehende elektrische Ausrüstung des Fahrzeugs erfasst werden. Die fahrzeugseitigen Schnittstellen (Input/Output) sind neben funktionellen Stromlaufplänen zu beschreiben. Gerade bei Bestandsfahrzeugen ist zu prüfen, ob die Anforderungen an Sicherheitsfunktionen im Bereich der Fahrzeugsteuerung den aktuellen Sicherheitsanforderungen entsprechen (vgl. [4], [5] und [6]). Gegebenenfalls sind in Abstimmung mit der Zulassungsbehörde (z.B. Technische Aufsichtsbehörde, TAB) Modifikationen an der Fahrzeugsteuerung erforderlich. In der Regel kommt es hier zu einem größeren Abstimmungsbedarf zwischen dem Fahrzeughersteller und dem Lieferanten des CBTC-Systems. Die Signale zwischen Fahrzeugsteuerung und CBTC-System können in sichere und nicht-sichere Signale unterteilt werden.

- *Sichere Signale/Funktionen: (SIL  $\geq$  1):* Beispiele für sichere Eingangssignale von der Fahrzeugsteuerung an das CBTC-System sind Bestätigungstaster, Taster für den Start des halbautomatischen Betriebs, Status der Sicherheitsbremse, Türstatus (vgl. [7]), Zugintegrität, Kuppelstatus. Beispiele für sichere Ausgangssignale des CBTC-Systems zur Fahrzeugsteuerung sind unter anderem die Ansteuerung der Sicherheitsbremse, die sichere Antriebssperre, bzw. Traktionsfreigabe (oft in Bestandsfahrzeugen fahrzeugseitig nicht vorhanden), die Türfreigabe und die Blockierung der Türen (Freigabe Türnotentriegelung).

- **Nicht-sichere Signale/Funktionen (SIL < 1):** Diese Signale sind zu definieren. Hier ist jeweils festzulegen, wie die Signale im Bereich der Fahrzeugsteuerung abgegriffen werden sollen, bzw. an diese übergeben werden sollen. Neben Hardwareänderungen am Fahrzeug sind ggf. auch Änderungen im Bereich der Software der Fahrzeugsteuerung erforderlich. Bevorzugt wird die Übertragung nicht sicherer Signale über den jeweiligen Fahrzeugbus (z.B. Multifunction Vehicle Bus, MVB oder Ethernet-Consistent Network, ECN [12]). Bei Bestandsfahrzeugen muss oft auf die Übertragung von Einzelsignalen zwischen Zugsicherungssystem und Fahrzeugsteuerung zurückgegriffen werden.

#### 1.4. Abstimmung Fahrzeugparameter

CBTC-Systeme haben Bremsmodelle, die gemäß der für das jeweilige Fahrzeug charakteristischen Parameter in anwendungsspezifisch konfigurierbaren Systemen hinterlegt werden. Möglicherweise müssen diese Parameter durch praktische Erprobungen ermittelt werden. Zu bestimmen sind die Parameter von:

- **Traktionsabschaltung:** Zeit vom Einleiten einer Zwangsbremung bis die Zugkraft abgebaut ist.
- **Reaktionszeit:** Zeit bis zur Übertragung des Bremsignals im Zugverband und die Aufbauzeit der Bremskraft in den Bremssystemen der einzelnen Wagen.
- **Bremsverzögerung:** Mittlere Verzögerung während der Abbremsung, gestaffelt nach verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen.

Die Bremsmodelle werden in der Regel für jede Fahrzeugserie unterschiedlich parametrisiert. Die Parameter können für die Betriebsbremsung und für die Zwangsbremung für jedes Bremsmodell unterschiedlich festgelegt werden. Sicherheitsrelevant ist nur die Zwangsbremung.

#### 2. Ausrüstung eines Prototypenfahrzeugs

Der Ausrüstung eines ersten Fahrzeugs eines Typs kommt im Projekt eine große Bedeutung zu.

- **Bestätigung der technischen Machbarkeit der Umrüstung:** Bei der Umrüstung des ersten Fahrzeugs zeigt sich in der Regel alsbald, ob die richtigen Prämissen in der mechanischen und elektrischen Integration berücksichtigt wurden. Basierend auf den Rückmeldungen aus der Montage werden die Pläne korrigiert.
- **Sammeln von Erfahrungen für den weiteren Projektverlauf:** Darüber hinaus werden bei der Ausrüstung der Prototypenfahrzeuge wesentliche Erfahrungen auch bezüglich der konkreten Durchführung der Montageaktivitäten gesammelt, welche die Prämissen der Terminplanung (bspw. für die Zeitdauer der Umrüstung) bestätigen. So kann für den weiteren Verlauf des Projektes eine valide Hochrechnung für die Umsetzung der Ausrüstungsstrategie erfolgen und mit dem Betrieb abgestimmt werden.

Nach Abschluss der Ausrüstung des Prototypenfahrzeugs kann dieses im Probebetrieb und realitätsnahen Bedingungen erprobt werden.

#### 3. Fahrten zur Ermittlung der Gebrauchsfähigkeit

Gerade die Erprobung des ersten Fahrzeugs einer Serie ist für den Erfolg eines Ausrüstungsprojekts von zentraler Bedeutung. In der Erprobung werden sowohl die mechanische und elektrische Integration bestätigt als auch die korrekte Abbildung der Fahrzeugparameter in der Software des CBTC-Fahrzeugeräts überprüft. Gegebenenfalls erfolgen nach den Testfahrten Justierungsarbeiten am Erprobungsfahrzeug und dann die notwendigen Korrekturen der Planunterlagen, so dass anschließend die Betriebsgenehmigung für das erste Fahrzeug der Serie bei der Zulassungsbehörde erwirkt werden kann. Sobald es die mit CBTC ausgerüstete Strecke zulässt, folgen Probefahrten zur:

- Durchführung dynamischer Tests: das Verhalten des Fahrzeugs im Betrieb wird überprüft.
- Messung von Bremswegen und Untersuchungen zur Haltepunktgenauigkeit, insbesondere bei höheren Automatisierungsgraden (> GoA2).
- Prüfung der korrekten sicherheitsgerichteten Funktionen bei ausgewählten Ausfallszenarien.

Hierfür müssen umfassende Testfallszenarien definiert werden. Diese werden anschließend unter reproduzierbaren Bedingungen in die Probefahrten eingebaut. Abschließend werden Testberichte erstellt und in den Tests erkannte Abweichungen systematisch nachverfolgt. Die Testberichte werden als Grundlage für eine unabhängige Sicherheitsbewertung herangezogen.

#### 4. Zulassung des Prototypenfahrzeugs

In der Regel wird von den Betreibern die Inbetriebnahme von Fahrzeugen beantragt, die serienmäßig nach denselben Bauunterlagen gebaut werden. Gemäß geltendem Recht (in Deutschland: Verordnung über den Bau und Betrieb von Straßenbahnen, BOStrab, [9]), brauchen diese Unterlagen nur beim Antrag auf Inbetriebnahme des ersten Fahrzeugs der Serie vorgelegt zu werden. Für die Zulassung eines Fahrzeugtyps mit dem neuen CBTC-System müssen folgende Aspekte betrachtet werden:

- Analyse der Auswirkungen der Integration der CBTC-Fahrzeugeräte auf die bestehende Fahrzeugzulassung (z. B.



2: Die Erprobung des ersten Fahrzeugs einer Serie ist für den Erfolg eines Ausrüstungsprojekts von zentraler Bedeutung

Quelle: Siemens AG

Brandschutz entsprechend EN 45545-5 [10] und Funktionaler Sicherheitsnachweis).

- Erstellung der erforderlichen Sicherheitsnachweise für Anpassungen am Fahrzeug wie bspw. Brandschutz, Bremsenrichtung und funktionaler Sicherheitsnachweis.
- Koordination der Begutachtung mit mehreren beteiligten Gutachtern.
- Koordination der Fahrzeugzulassung mit der Technischen Aufsichtsbehörde (z. B. gemäß [8]).

Liegt eine Inbetriebnahmegenehmigung für einen Fahrzeugtyp vor, kann anschließend auf der Grundlage der Typzulassung mit dem Umbau weiterer Fahrzeuge der Serie begonnen werden.

### 5. Ausrüstung der gesamten Fahrzeugflotte

Nach dem Probetrieb müssen die erforderlichen Unterlagen so aufbereitet werden, dass das erprobte CBTC-System in alle Fahrzeuge eines Typs integriert werden kann. Es ist davon auszugehen, dass es in unterschiedlichen Fahrzeugtypen unterschiedliche Interfaces zwischen CBTC-System und Fahrzeugsteuerung geben wird. Daher ist für andere Fahrzeugtypen entsprechend die Konzeptionsphase separat zu durchlaufen.

Weitere Fahrzeuge dürfen nach §62 BOSTrab bis zu sieben Jahre nach Inbetriebnahme des ersten Fahrzeugs der Serie in Betrieb genommen werden, wenn der Unternehmer zum Zeitpunkt der erstmaligen Inbetriebnahme des jeweiligen Fahrzeugs eine Erklärung des Herstellers über die Konformität dieser Fahrzeuge mit dem genehmigten ersten Fahrzeug gegenüber der Technischen Aufsichtsbehörde vorlegt.

### 6. Instandhaltung und Außerbetriebnahme

Dem Lebenszyklusansatz der relevanten allgemein anerkannten Regeln der Technik folgend, müssen bereits zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme auch die folgenden Lebenszyklusphasen mit bedacht werden.

Damit zu jeder Zeit ein sicherer und ordnungsgemäßer Betrieb möglich ist, ist hierfür zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme vom Betreiber ein Instandhaltungskonzept vorzulegen (vgl. z.B. [8]). Dieses umfasst neben einer Definition der kleinsten tauschbaren Einheiten (line replaceable

units, LRU) auch eine Definition der umzusetzenden Instandhaltungsstrategie (präventiv, korrektiv oder zustandsorientiert, bzw. eine bedarfsgerechte Kombination hieraus). Die Fristen für die jeweiligen Instandhaltungsaktivitäten (Inspektionen beispielsweise nach §57 BOSTrab, Instandsetzung oder Wartung) werden in einem Instandhaltungsplan nachvollziehbar dokumentiert.

Bereits zum Zeitpunkt der Konzeption eines Produktes müssen grundlegende Anforderungen wie Gesundheitsschutz und der Schutz der Umwelt mit bedacht werden. Diese werden spätestens dann relevant, wenn das Fahrzeug eine grundlegende Aufarbeitung erfährt oder aber außer Betrieb genommen und in verschiedene Wertstofffraktionen aufgetrennt wird. Von den Herstellern vorzulegende Erklärungen zur umweltgerechten Produktgestaltung müssen beispielsweise darlegen, dass bestimmte Substanzen, Schwermetalle und bromierte Flammschutzmittel/ Weichmacher in den Komponenten und Systemen vermieden werden. Diese Eigenerklärung der Hersteller wird üblicherweise mit „Re-

striction of (the use of certain) Hazardous Substances in electrical and electronic Equipment“ (RoHS) bezeichnet [11]. ●

#### Literatur

[1] IEC 62290: Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems – Part 1: System principles and functional concepts, Edition 2.0, 2014-07

[2] UIC 651:2002-07: Layout of driver's cabs in locomotives, railcars, multiple unit trains and driving trailer.

[3] DIN EN 16186-1:2019-04: Bahnanwendungen-Führerraum – Teil 1: Anthropometrische Daten und Sichtbedingungen. Deutsche Fassung EN 16816-1:214+A1:2018

[4] DIN EN 16186-1:2019-04: Bahnanwendungen-Führerraum – Teil 1: Anthropometrische Daten und Sichtbedingungen. Deutsche Fassung EN 16816-1:214+A1:2018

[5] VDV-Schrift 161-2: Sicherheitstechnische Anforderungen an die elektrische Ausrüstung (10/2009)

[6] IEC 62267: Railway applications – Automated urban guided transport (AUGT) – Safety requirements, Edition 1.0, 2009-07

[7] VDV-Schrift 157: Anforderung an den Einklemm- und Verletzungsschutz sowie Notöffnungseinrichtungen an Türen (04/2020)

[8] Technische Aufsichtsbehörde Nordrhein-Westfalen (Bezirksregierung Düsseldorf): Checkliste Fahrzeuginbetriebnahme.

[9] Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 11. Dezember 1987 (BGBl. I S. 2648), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 1. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1410) geändert worden ist

[10] DIN EN 45545-5:2016-01: Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 5: Brandschutzanforderungen an die elektrische Ausrüstung einschließlich der von Oberleitungsbussen, spurgeführten Bussen und Magnetschwebfahrzeugen.

[11] Richtlinie (EU) 2015/863 der Kommission vom 31. März 2015 zur Änderung von Anhang II der Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Liste der Stoffe, die Beschränkungen unterliegen

[12] DIN EN 61375-3-4:2015-10: Elektronische Betriebsmittel für Bahnen – Zug-Kommunikationsnetzwerk (TCN) – Teil 3-4: Ethernet-Consist-Netzwerk (ECN)

#### Summary

#### Integration of CBTC systems in rail vehicles

Train protection systems in European metro networks and light-rail networks have reached and partly exceeded their operational life time. At the same time the increasing transport demand requires an increase in the performance of urban rapid transit systems. For this reason, existing fleet will be converted to new train protection systems on a large scale and implemented in future. Here, a close cooperation between vehicle manufacturer, CBTC-manufacturer and approval authority is essential.

**Automation of software tests with artificial intelligence**

**A strong partner at your side!**

**ESE**  
Engineering und Software-Entwicklung  
www.esede.de