

Vehicle-to-Everything für Straßen- und Stadtbahnen

Vehicle-to-Everything for Light Rail

Carlsson Scholl

Obwohl Vehicle-to-Everything (V2X) hauptsächlich von der Automobilindustrie vorangetrieben wird und in einem frühen Einführungsstadium ist, hat es das Potenzial, zu einer entscheidenden Komponente für Stadt- und Straßenbahnen (LRT – Light Rail Transit) zu werden. Dieser Beitrag gibt einen Überblick, wie und ob V2X die Zukunft von LRT verändern und gestalten kann.

1 Die Grundlagen von V2X

V2X ist ein bidirektionaler, breitbandiger Kommunikationsstandard, der in Kombination mit Positionsbestimmung und Zeitsynchronisation über das globale Navigationssatellitensystem (GNSS) verwendet wird. Um die Positionsbestimmung zuverlässiger und genauer zu machen, wird häufig differenzielles GPS (DGPS) in Kombination mit Echtzeit-Kinematik (RTK – Real Time Kinematic) verwendet. Es stehen verschiedene DGPS-Dienste zur Verfügung, die die Genauigkeit der Positionsbestimmung auf unter 10 cm verbessern.

Es gibt zwei unterschiedliche Varianten von V2X:

1. Die WLAN-basierte V2X-Variante verwendet IEEE 802.11p als Bitübertragungsschicht, wobei IEEE802.11bd der Nachfolger für V2X der nächsten Generation ist.
2. Die mobilfunkbasierte V2X-Variante (C-V2X) nutzt LTE oder 5G gemäß 3GPP TR 21.914 (LTE) bzw. TR 21.917 (5G) als Bitübertragungsschicht.

Beide V2X-Varianten haben eine wichtige Gemeinsamkeit: Sie bieten Ad-hoc-Verbindungen zwischen zwei Geräten im 5,9-GHz-ITS-Frequenzband, ohne dass eine Basisstation als Knotenpunkt zwischen zwei Geräten benötigt wird. Diese Ad-hoc-Konnektivität ist aus dem alltäglichen WLAN (z. B. Mobiltelefone, Drucker) recht gut bekannt. Bei LTE oder 5G wird dies durch die Nutzung der PC5-Schnittstelle über Sidelink [1] erreicht. Die Ad-hoc-Verbindung bietet Unabhängigkeit von knotenbasierten und in den meisten Fällen öffentlichen Mobilfunknetzen und ermöglicht eine zuverlässige, direkte Nahbereichskommunikation (DSRC – Dedicated Short Range Communication) zwischen Fahrzeugen und streckenseitiger Infrastruktur.

Zwei unterschiedliche V2X-Varianten zu haben ist natürlich nicht optimal, und es wird sich zeigen, welcher der beiden Standards sich durchsetzen wird. Zumindest in den USA hat Wi-Fi-basiertes V2X seit der Entscheidung der FCC im Jahr 2022, die unteren 45 MHz des lizenzierten ITS-Frequenzbereichs (5,850-5,895 GHz) dem nicht lizenzierten ISM-Band für öffentliches WLAN und die verbleibenden oberen 30 MHz (5,895-5,925 GHz) ausschließlich dem C-V2X zuzuweisen [2], keine Zukunft mehr. Dies wird sicherlich auch den globalen V2X-Markt beeinflussen, aufgrund der fehlenden Nutzung und der entsprechend schrumpfenden Nachfrage nach Wi-Fi-basierten V2X-Chipsätzen. Dies könnte dazu führen, dass andere Länder dem Beispiel der USA folgen. Um zu vermeiden, dass Investitionen in V2X-Ausrüstung vorzeitig obsolet werden, haben sich die Anbieter bereits angepasst und bieten sowohl Fahrzeuggeräte (OBU – On Board Unit) als auch Streckengeräte (RSU – Road Side Unit) mit dualen Funk-Transceiver-Einheiten an, die sowohl V2X als auch C-V2X beherrschen.

Despite being pushed mainly by the automotive industry and still being in the early stages of adoption, Vehicle-to-Everything (V2X) has the potential to become a critical component in light rail transit (LRT) and tram systems in the not-too-distant future. This article will provide an overview of how and whether V2X can change and shape the future of LRT.

1. The basics of V2X

V2X is a bi-directional, high-capacity communications standard used in combination with position determination and time synchronisation via the global navigation satellite system (GNSS). Differential GPS (DGPS) is often used in combination with real-time kinematic (RTK) in order to make the position determination more reliable and accurate. There are different DGPS services available which improve accuracy to below 10 cm.

There are two distinct variants of V2X:

1. the Wi-Fi-based V2X variant uses IEEE 802.11p as the physical layer with IEEE802.11bd being the successor for the next generation of V2X.
2. the cellular-based V2X variant uses LTE or 5G in accordance with 3GPP TR 21.914 (LTE) or TR 21.917 (5G) as the physical layer.

Both V2X variants have one important thing in common: they offer ad hoc connections between two devices in the 5.9 GHz ITS frequency band without the need for a base station as a node between two devices. This ad hoc connectivity is quite well known from consumer Wi-Fi (e.g. mobiles, printers). With LTE or 5G, this is achieved using the PC5 interface via Sidelink [1]. The ad hoc connection provides independence from node-based and, in most cases, public communication network infrastructures and allows reliable, direct short-range communication (DSRC) between vehicles and trackside infrastructure. Having two different V2X variants is, of course, not optimal and time will tell as to which of the two standards will prevail. Wi-Fi-based V2X does not have a future, at least in the US, since the FCC's 2022 decision to reallocate the lower 45 MHz of the licensed ITS frequency range (5.850-5.895 GHz) to the unlicensed ISM band for home Wi-Fi users and the remaining upper 30 MHz (5.895-5.925 GHz) band exclusively to cellular V2X [2]. This will certainly also influence the global V2X market, due to the lack of use and corresponding shrinking demand for Wi-Fi-based V2X chipsets. This might prompt other countries to follow suit.

In order to avoid any investments in V2X equipment becoming prematurely obsolete, suppliers have already adapted and offer both onboard (OBU) and roadside units (RSU) with dual radio transceiver units that are capable of cellular and Wi-Fi-based V2X.

2 Wie V2X im Vergleich zu CBTC abschneidet

Wenn wir uns die Hauptmerkmale eines kommunikationsbasierten Zugsicherungssystems (CBTC – Communication Based Train Control) ansehen, die in Abschnitt 4.1 der IEEE 1474.1 definiert sind, wird ersichtlich, dass V2X zwei von drei Kriterien erfüllt:

1. Hochauflösende Zugortbestimmung, unabhängig von Gleisstromkreisen
2. Kontinuierliche bidirektionale Datenkommunikation mit hoher Kapazität vom Zug zur Strecke

Lediglich das dritte Merkmal ist nicht erfüllt, nämlich:

3. Zugseitige und streckenseitige Verarbeitungseinheiten, die ausfall- und verfahrenssichere Funktionen erfüllen

Somit kann V2X Funktionen und Vorteile eines CBTC-Systems bieten, ohne ein automatisches Zugsicherungssystem (ATP – Automatic Train Protection) zu sein.

3 Erforderliche Hardware

Um V2X für LRT zu nutzen, ist im Minimalfall nur eine OBU pro Führerstand sowie RSU, die die Schnittstelle zur Streckenseite bilden, notwendig.

Eine V2X OBU besteht aus einer Zentraleinheit, einer Multiband-Antenne und einer Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI – Human Machine Interface).

Eine V2X RSU ist typischerweise eine kompakte Box, ähnlich einem handelsüblichen WLAN-Router, die auf einem Mast in ca. 3-5 m Höhe montiert wird.

Neben der RSU wird typischerweise ein Schnittstellenkonverter benötigt, um die zwischen OBU und RSU ausgetauschten V2X-Telegramme in das entsprechende Format zu konvertieren, das mit dem jeweiligen Streckensystem (z.B. Lichtsignalsteuergerät, Weichensteuergerät oder Bahnübergang) kompatibel ist.

Die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Streckenelementen funktioniert über DSRC, ohne zusätzliche Netzwerkinfrastruktur.

Für erweiterte und verbesserte Funktionalität können zentrale V2X-Verwaltungsserver in die Leitzentrale integriert und OBU sowie RSU mit mobiler Datenkommunikation ausgerüstet werden.

2 How V2X compares to CBTC

If we look at the primary characteristics of a CBTC system (CBTC – Communication-based Train Control) as defined in section 4.1 of IEEE 1474.1, we can see two out of three of them being fulfilled by V2X, namely:

1. high-resolution train location determination, independent of track circuits
2. continuous, high capacity, bidirectional train-to-wayside data communications

Only the third characteristic is not fulfilled, namely:

3. train-borne and wayside processors performing vital functions
- As such, V2X can offer the functions and advantages of a CBTC system without being an automatic train protection (ATP) system.

3 Required hardware

V2X has a very lean footprint. Only an OBU in each cab and an RSU connected to the elements along the trackside are required for a minimal setup.

A V2X OBU consists of a central unit, a multiband antenna and a human-machine interface (HMI).

A V2X RSU is typically a compact box, similar in appearance to a commercial Wi-Fi router, which is mounted on a mast at a height of approximately 3-5 m.

In addition to the RSU, a small interface converter is typically required to convert the V2X telegrams exchanged between the OBU and the RSU into the appropriate format compatible with the respective wayside system (e.g. the traffic light controller, point controller or level crossing).

The communication between the vehicles and the wayside elements takes place via DSRC without the need for any additional network infrastructure.

Central V2X management servers can be integrated into the central control room for advanced and enhanced functionalities along with wide area connectivity via cellular networks for the OBU and RSU.

Bild 1: V2X-OBU für Stadtbahnen

Fig. 1: A V2X OBU for light rail vehicles

Quelle: aller Bilder / Source all images: Yunex GmbH





Bild 2: Kompakte V2X-RSU mit internen Antennen und PoE

Fig. 2: A compact V2X RSU with internal antennae and power-over-Ethernet

4 Beispiele für V2X-Anwendungsfälle

Der Einsatz der V2X-Technologie für Stadtbahnen kann mehrere Aspekte des Betriebsmanagements, der Entscheidungsunterstützung, der Fahrerassistenz, der Datenkommunikation und der Überwachungsfunktionen abdecken.

4.1 Ersatz konventioneller Meldungsübertragungstechnik (TWC)

V2X bietet viele Vorteile gegenüber herkömmlichen TWC-Systemen, die derzeit weit verbreitet sind. Die meisten dieser Systeme basieren auf punktförmiger, unidirektionaler Kommunikation mit geringer Bandbreite von Zug zu Strecke unter Verwendung von induktiver Meldungsübertragung, Infrarot oder analogem Funk. Diese Technologien altern schnell, erfordern einen erheblichen Installations- und Wartungsaufwand (sowohl fahrzeug- als auch streckenseitig), können nicht einfach angepasst oder verlegt werden und funktionieren nur an einem bestimmten Ort für einen einzigen Zweck. Keine Installation von Komponenten im Unterflurbereich und keine Installation von Geräten zwischen oder neben den Schienen oder sogar eingebettet in Beton oder Asphalt auf der Straße.

4.2 Geschwindigkeitsüberwachung (nicht ausfall- oder verfahrenssicher)

In der einfachsten Form ist es mit V2X möglich, eine Geschwindigkeitsüberwachungsfunktion für Stadtbahnen zu realisieren, die lediglich eine OBU pro Führerstand benötigt. Auch wenn die Geschwindigkeitsüberwachung und Ausgabe eines Signals zur Auslösung der Zwangsbremse keine ausfall- oder verfahrenssicheren Funktionen sind, erhöhen sie doch die Sicherheit für Fahrer und Fahrgäste. Wenn mehr Flexibilität und nicht nur die Überwachung von permanenten Geschwindigkeitsbeschränkungen in fest definierten Streckenabschnitten erforderlich ist, ermöglicht ein zentraler V2X-Server in Verbindung mit einer Mobilfunkverbindung zur OBU das Einstellen und Ändern von Geschwindigkeitsbeschränkungen und Überwachungsbereichen mit wenigen Mausklicks.

4 Examples for V2X use cases

The use of V2X technology for light rail can cover several aspects of operations management, decision support, driver assistance, data communication and supervision functions.

4.1 Replacing conventional TWC equipment

V2X offers many advantages over the conventional TWC systems currently installed around the globe. Most of these systems rely on intermittent, low-bandwidth, unidirectional communication from trains to trackside using inductive telegram transmission, infrared or analogue radio. These technologies are aging fast, require significant installation and maintenance efforts (onboard as well as wayside), cannot be easily modified or relocated and only work at a specific location for a single purpose. There is no need to install any underfloor equipment, which is particularly troublesome on low floor vehicles, and likewise no need to install any equipment between or next to the rails in the track bed or even embedded in the concrete or asphalt in the street.

4.2 Non-vital speed supervision

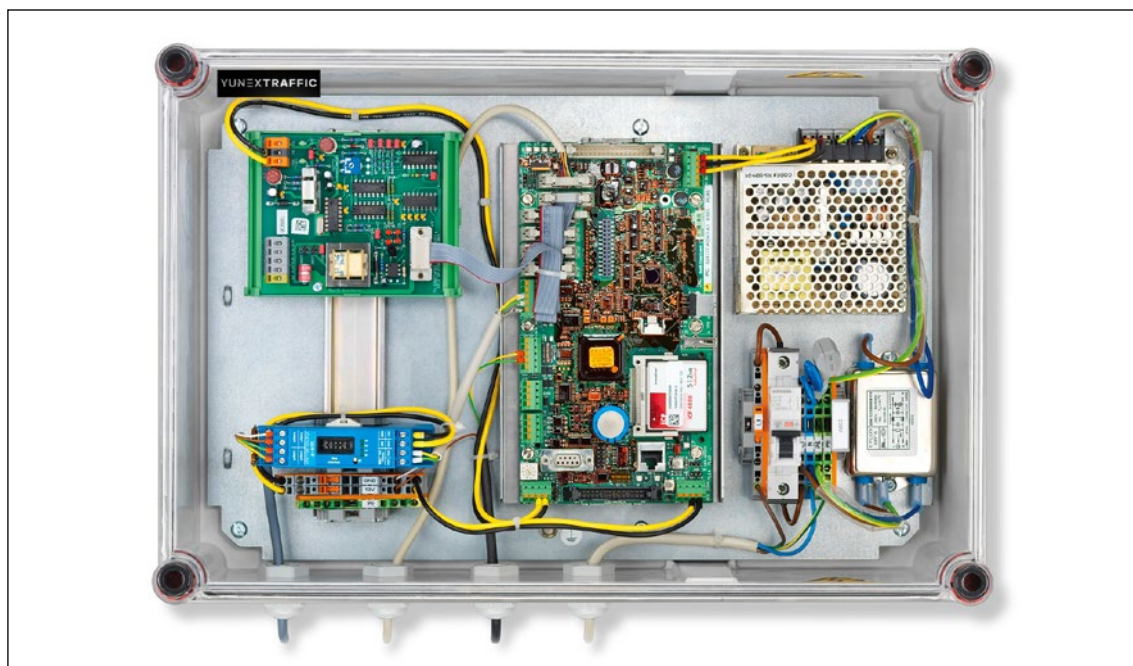
In its most basic form, it is possible to add a speed supervision function for light rail vehicles only by installing one V2X OBU and antenna in each cab. Even though speed supervision and the emission of a signal to trigger the emergency break, if the maximum permitted speed is exceeded, is not a vital function, it will still increase the safety for the driver and the passengers. If more flexibility and not just the supervision of the permanent speed restrictions in fixed track sections are required, adding a central V2X server and wide area connectivity via cellular networks for the OBU will enable setting and changing the speed restrictions and areas of enforcement with a few mouse clicks.

4.3 Train supervision, train tracking and fleet management

Adding central V2X servers and enabling wide area connectivity via public cellular networks for the OBU and RSU enables light

Bild 3: V2X-Schnittstellenkonverterbox für die Streckenausrüstung

Fig. 3: V2X A roadside interface converter box



4.3 Zugüberwachung, Zugverfolgung und Flottenmanagement

Mit V2X-Servern und aktivierter Mobilfunkverbindung der OBU und RSU erhalten Stadtbahnbetreiber die Möglichkeit für ein verbessertes Flotten- und Betriebsmanagement. Der Fahrdienstleiter hat in Echtzeit einen Überblick über die Position aller Stadtbahnfahrzeuge und kann Zugregelungsmaßnahmen einleiten, um Zugbündelungen zu vermeiden oder Verspätungen auszugleichen.

4.4 Virtuelle Fahrsperr (nicht ausfall- oder verfahrenssicher)

Eine weitere sicherheitssteigernde, wenn auch nicht ausfall- oder verfahrenssichere Funktion, die sich mit V2X realisieren lässt, ist die sogenannte virtuelle Fahrsperr. Sie funktioniert sehr ähnlich wie eine mechanische, elektrische oder magnetische Fahrsperr, indem sie unter bestimmten Bedingungen die Zwangsbremse auslöst. Die Bedingung selbst und der genaue Ort, an dem die Bedingung zu einer Notbremsung führt, kann in der zentralen V2X-Software flexibel definiert und ebenso einfach geändert oder entfernt werden. Diese Funktion kann in Sichtfahrbereichen helfen, die Wachsamkeit des Zugführers zu ergänzen, um so den Schutz und die Sicherheit von Fahrer und Fahrgästen zu erhöhen.

4.5 Fahrerassistenz- und Warnungsfunktion

Bis V2X flächendeckend in Pkw, Lkw, Bussen und am Straßenrand verfügbar ist, wird noch einige Zeit vergehen. Sobald es allgegenwärtig ist, wird das vernetzte Fahren dazu beitragen, Unfälle mit Warn- und Assistenzfunktionen wie Schutz vulnerabler Verkehrsteilnehmer (VRU – Vulnerable Road User), Stauwarnung (TJW – Traffic Jam Warning), Baustellenwarnung (RWW – Road Works Warning), Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA) und anderen, zu reduzieren und zu vermeiden.

5 Vorteile und Kosteneinsparungen

Auch wenn es nur als eigenständiger Ersatz für herkömmliche und teilweise veraltete TWC-Systeme verwendet wird, bietet V2X viele Vorteile. Der größte Mehrwert kann jedoch durch den Einsatz von V2X auch für die automatische Zugverfolgung, Zugüberwachung, Fahrerassistenz und sogar sicherheitssteigernde, aber nicht

rail operators to obtain a much desired means of improved fleet and operations management. The dispatcher will have a real-time view of all the light rail vehicles' positions and will be able to initiate train regulation measures to avoid the bunching of trains or to recover any delays.

4.4 Non-vital trip stop

Another safety-increasing, albeit non-vital, function that can be implemented with V2X is the so-called virtual trip stop. It works very similarly to an actual mechanical, electrical or magnetic trip stop system by triggering the emergency brake under certain conditions. The condition and the exact location at which the condition leads to emergency braking can be flexibly defined in the central V2X software and just as easily modified or removed. It can be added in line-of-sight driving environments to add an element of protection and safety in a non-vital way to supplement the train operator's vigilance.

4.5 Driver assistance and warning

It may still take a while before V2X is universally available in cars, trucks, buses and on the roadside. Once it becomes ubiquitous, the collective awareness among connected vehicles will help prevent accidents with warning and assistance functions like vulnerable road user protection (VRU), traffic jam warnings (TJW), road works warnings (RWW), green light optimal speed advisories (GLOSA) and others.

5 The benefits and cost savings

Even if only used as a stand-alone replacement for conventional and partly obsolete train-to-wayside communication (TWC) systems, V2X offers a lot of benefits. However, the biggest added value can be achieved by using V2X as an enabler for automatic train tracking, train supervision, driver assistance and even for some safety-increasing, but non-vital, functions such as speed supervision or trip stop. It is even possible to build-up a city-wide and integrated traffic management system for rail and road-based traffic using the synergies and advantages of V2X – and all of this without an actual CBTC system.

ausfall- oder verfahrenssichere Funktionen wie Geschwindigkeitsüberwachung oder virtuelle Fahrsperrung, erzielt werden. Mit den Synergien und Vorteilen von V2X ist es sogar möglich, ein stadtweites und integriertes Verkehrsmanagementsystem für den schienen- und straßengebundenen Verkehr aufzubauen – und das alles ohne CBTC.

5.1 Einfache Installation und Wartung

Die Installation und Integration von V2X-Geräten sind einfach und aufwandsarm möglich. Auf Fahrzeugen müssen lediglich die OBU inklusive Dachantenne und HMI mit 12 V-Stromversorgung sowie Ethernet, RS485 oder Digital I/O als einzige verkabelte Schnittstellen ausgestattet werden. Auf der Streckenseite kann eine RSU bequem an vorhandenen Masten montiert werden. Für die Datenschnittstelle und Stromversorgung mittels Power over Ethernet (PoE) ist lediglich ein Netzkabel erforderlich. Gegebenenfalls erforderliche Schnittstellenkonverter können in vorhandene Schränke der entsprechenden streckenseitigen Ausrüstung eingebaut werden. Die Geräte bleiben leicht zugänglich und können bei Störungen schnell überprüft, zurückgesetzt oder ausgetauscht werden. Es müssen keine Geräte zwischen oder neben den Schienen installiert oder gar in den Beton oder Asphalt auf der Straße eingebettet werden. Aufwendige Tiefbauarbeiten mit den damit verbundenen Straßensperrungen zur Öffnung und Wiederversiegelung der Straßendecke gehören somit der Vergangenheit an.

5.2 Flexibilität

Jedes herkömmliche TWC-System ist auf punktförmige, ortsfeste Datenübertragungen zum Anfordern einer Fahrstraße oder einer Vorrangschaltung beschränkt. Solche Auslösepunkte/-bereiche räumlich entlang der Strecke zu verschieben, ist nur durch physisches Versetzen der installierten Komponenten möglich. Mit V2X können solche Änderungen einfach in der Software durchgeführt werden. Mit wenigen Mausklicks können An- oder Abmeldebereiche grafisch auf einer Kartenansicht hinzugefügt, verändert oder verschoben und die Änderungen drahtlos an OBU und RSU weitergegeben werden.

5.3 Verwendung von handelsüblichen (COTS) Geräten

Die V2X-Hardwarekomponenten sind die gleichen, die für die Automobilindustrie gefertigt und verwendet werden. Somit gibt es einen enormen Skaleneffekt in Bezug auf die Nachfrage nach Chipsätzen und Modulen sowie zahlreiche Lieferanten. Dies gewährleistet eine gute Verfügbarkeit von Teilen und Komponenten und eine kontinuierliche Entwicklung und Unterstützung durch die Komponentenhersteller. Da die Autohersteller die V2X-Funktionalität als Teil des Standardpakets für immer mehr Autos anbieten werden, wird die V2X-Ausrüstung zunehmend an Verbreitung gewinnen. Und aufgrund der Standardisierung von V2X werden das Obsoleszenzmanagement sowie die Migration und das Upgrade nach mehreren Jahren erleichtert.

5.4 Modularität und Skalierbarkeit

Es ist problemlos möglich, V2X-Ausrüstung parallel zu bestehenden konventionellen Installationen einzusetzen und ein altes System schrittweise auf V2X aufzurüsten und zu migrieren. Darüber hinaus kann die Einführung von V2X in mehreren Stufen erfolgen, die der erforderlichen Funktionalität und dem verfügbaren Budget eines Stadtbahnbetreibers entsprechen. Es ist möglich, mit einer reinen OBU-Konfiguration zu beginnen, um die Geschwindigkeitsüberwachung einzuführen, später RSU hinzuzufügen, um das Anfordern von Ampelvorrangschaltung oder

5.1 Ease of installation and maintenance

The installation and integration of V2X equipment is simple and fast. Only the OBU, including the antenna and HMI, need to be fitted onto the vehicles with a 12 V power supply and the Ethernet. RS485 or digital I/O are the only interfaces that require wiring. Trackage, an RSU can be conveniently mounted to existing masts and only an Ethernet cable is required for the data connectivity and power over Ethernet (PoE). Any required interface converter can be installed in the existing cabinets of the relevant trackside equipment.

The equipment remains easily accessible and can be quickly checked, reset or replaced in the case of any malfunctions. There is no installation of trackside equipment between or next to the rails or even embedded under the street's surface. Burdensome road works with associated street lane closures are a thing of the past.

5.2 Flexibility

Any conventional TWC is limited to intermittent data transmissions at defined, fixed locations for triggering the traffic signal priority or requesting a route setting from an interlocking. If the need arises to move such trigger points/areas further up or down the track, this can only be achieved by physically relocating the installed equipment. With V2X, such modifications and changes can be made simply in the software, provided the new position remains within the radio coverage of an RSU (typically between 100-300 m). Geofencing areas can be graphically added, reshaped or shifted on a map view with just a few mouse clicks and the changes can be propagated to the OBU and RSU over the air.

5.3 The use of commercial off-the-shelf (COTS) equipment

The V2X hardware components are the same as the ones used for the automotive industry. Thus, there is a huge economy of scale in terms of demand for chipsets and modules as well as numerous suppliers. This ensures good availability of the parts and components and continuous development and support from component manufacturers. The fact that carmakers will add V2X functionality to the standard packages for more and more cars means that V2X equipment will become an affordable commodity. And the standardisation of V2X will mean that obsolescence management and migration and upgrades after several years will be facilitated.

5.4 Modularity and scalability

It is easy to deploy V2X equipment in parallel with existing conventional installations and to upgrade and migrate from an old system to V2X in a stepwise fashion. Furthermore, the introduction of V2X equipment can be done in several stages matching the required functionality and the available budgets of the light rail operators. It is possible to start with an OBU-only configuration to introduce speed supervision, add the RSU later to enable TSP and route requests from point controllers with DSRC and finally add cellular connectivity and central control servers for advanced management and supervision functions.

6 V2X on the rise

There are already several examples showing a growing trend for the use of V2X for light rail:

In early 2022, Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF) started a project together with Siemens Mobility GmbH aimed at upgrading and enhancing the train control system on its entire

Fahrstraßen mit DSRC zu ermöglichen, und schließlich Mobilfunkverbindungen für OBU und RSU sowie zentrale Steuerungs- und Verwaltungsserver für erweiterte Management- und Überwachungsfunktionen zu ergänzen.

6 V2X auf dem Vormarsch

Bereits heute gibt es mehrere Beispiele, die einen wachsenden Trend zur Verwendung von V2X für Stadtbahnen zeigen:

Anfang 2022 startete die Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF) gemeinsam mit der Siemens Mobility GmbH ein Projekt zur Modernisierung und Erweiterung des Zugsicherungssystems ihres gesamten Stadtbahnnetzes. Als weltweit erstes Projekt wird Frankfurt alle Fahrzeuge und Linien mit V2X ausrüsten lassen. Darüber hinaus werden die Tunnelabschnitte und die entsprechenden U-Bahn-Fahrzeuge mit CBTC für den GoA 2-Betrieb (Grade of Automation 2) ausgestattet. Auf den Straßenabschnitten übernimmt V2X alle Zugsteuerungs- und Überwachungsfunktionen, einschließlich aller Aspekte von TWC, automatischer Zugverfolgung, Geschwindigkeitsüberwachung und virtueller Fahrsperrung. Die erste Phase des Projekts (Linien U4 und U5) wird bis 2025 in Betrieb genommen, die restlichen Linien (U1-3 und U6-8) folgen anschließend bis 2031. Das Frankfurter Projekt Digital Train Control (DTC) [3] ist in das stadtweite MIND(+) [4] Programm, zur Integration des Straßen- und Schienenverkehrs in ein ganzheitliches multimodales, intelligentes, nachhaltiges und digitales Verkehrsmanagementsystem, eingebettet. Zu den wichtigsten innovativen Funktionen, die durch die V2X-Technologie in Frankfurt ermöglicht werden, gehören:

- Effizientes und nahtloses Management des gemischten GoA 2- und GoA 0-Betriebs im gesamten Netz
 - Zug-zu-Strecken-Kommunikation mit Stellwerken, Ampeln und Bahnübergängen
 - Virtuelle Fahrsperrung
 - Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA)
 - Ampelvorrangschaltung (TSP – Traffic Signal Priority)
 - Offene Kommunikationsschnittstelle für das Straßenverkehrsleitsystem (OCIT)
 - Nutzung einer international standardisierten und europaweit harmonisierten Lösung für C-ITS-Dienste über die C-ROADS-Plattform
- Andere Stadtbahnbetreiber auf der ganzen Welt haben ebenfalls bereits Tests zur Realisierbarkeit und den Vorteilen der Verwendung der V2X-Technologie für Stadtbahnen durchgeführt, hauptsächlich für Ampelvorrangschaltung-(TSP)- oder Kollisionsvermeidung-(CAS)-Funktionen. Tab. 1 enthält einige Beispiele.

7 Einschränkungen und Herausforderungen

Beim Einsatz von V2X gibt es weiterhin verschiedene Einschränkungen und Herausforderungen. Im Folgenden einige der häufig zu findenden Bereiche.

Wann	Wo	Wer	Was	Details
2019	Melbourne, Australien	Yarra Trams	TSP	[3]
2020	Hannover, Deutschland	UESTRA	TSP	[9]
2020	Ulm, Deutschland	Stadtwerke Ulm	TSP	[7]
2020	Ostrava, Tschechische Republik	Dopravn podnik Ostrava a.s.	CAS	[8]
2022	Kaohsiung, Taiwan	Kaohsiung Rapid Transit Corporation	CAS	[9]
2022	Seoul, Südkorea	Korea Railroad Research Institute	CAS	[10]

Tab. 1: V2X-Pilotprojekte für TSP und CAS weltweit

hybrid metro network. Frankfurt will be the first project worldwide to have all its vehicles and lines equipped with V2X. In addition, the tunnel sections and the corresponding vehicles operating on the subway will be equipped with CBTC for GoA 2 (Grade of Automation 2) operation. On the street-running sections, V2X will take care of all the train control and supervision functions including all the aspects of TWC, automatic train tracking, speed supervision and virtual trip stops. The first phase of the project (lines U4 and U5) will enter into revenue service by 2025, while the remaining lines (U1-3 and U6-8) will subsequently follow by 2031. Frankfurt's Digital Train Control (DTC) [3] project is embedded within the city-wide MIND(+) [4] program that integrates road and rail traffic into a holistic multimodal, intelligent, sustainable and digital traffic management system. The key innovative features enabled by V2X technology in Frankfurt include:

- managing mixed GoA 2 and GoA 0 operations across the entire network efficiently and seamlessly
- train-to-trackside communication with interlockings, traffic lights and level crossings
- virtual trip stop
- Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA)
- Traffic Signal Priority (TSP)
- Open Communication Interface for Road Traffic Control System (OCIT)
- The use of an internationally standardised and Europe-wide harmonised solution for C-ITS services via the C-ROADS platform

Other light rail operators around the globe have also already conducted tests into the viability and benefits of using V2X technology for TSP or collision avoidance system (CAS) functions. Tab. 1 shows some examples.

7 Limitations and challenges

The use of V2X still has some limitations and challenges. Some of the most common issues are stated in the following.

7.1 The accuracy of position determination

The use of DGPS with RTK is a must for highly accurate position determination that enables two trains standing next to each other on a double track line or in a yard to be distinguished. This works well and provides the required level of reliability and availability on the surface, even in cities with high-rise buildings. However, position determination using GNSS is difficult and not recommended for underground lines. Alternative means of position determination should be considered in tunnel sections. In many cases, this problem has a natural solution due to the mandatory requirement for a vital ATP system in the tunnel. Such a system will typically have its own

When	Where	Who	What	Details
2019	Melbourne, Australia	Yarra Trams	TSP	[3]
2020	Hannover, Germany	UESTRA	TSP	[9]
2020	Ulm, Germany	Stadtwerke Ulm	TSP	[7]
2020	Ostrava, Czech Republic	Dopravn podnik Ostrava a.s.	CAS	[8]
2022	Kaohsiung, Taiwan	Kaohsiung Rapid Transit Corporation	CAS	[9]
2022	Seoul, South Korea	Korea Railroad Research Institute	CAS	[10]

Tab. 1: Examples of V2X trials worldwide for TSP and CAS

7.1 Genauigkeit der Positionsbestimmung

Für eine hochgenaue Positionsbestimmung, die es ermöglicht, zwei nebeneinanderstehende Züge auf einer zweigleisigen Strecke oder in einem Betriebshof zu unterscheiden, ist der Einsatz von DGPS mit RTK ein Muss. Oberflächlich betrachtet funktioniert das gut und sorgt für die nötige Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit – auch in Städten mit Hochhäusern. Bei unterirdischen Strecken ist die Positionsbestimmung über GNSS jedoch schwierig und nicht empfehlenswert. In Tunnelabschnitten sollten stattdessen andere Systeme zur Positionsbestimmung in Betracht gezogen werden. In vielen Fällen hat dieses Problem eine natürliche Lösung gefunden – und zwar aufgrund der normativen Anforderung, im Tunnel ein Zugsicherungssystem einsetzen zu müssen. Ein solches System verfügt über eigene Systeme zur Positionsbestimmung, entweder durch Gleisfreimeldung mit Achszählern oder Gleisstromkreisen oder durch CBTC.

7.2 Mobilfunkverbindung

Für DGPS und die erweiterten V2X-Funktionen ist eine kontinuierliche Datenverbindung erforderlich. Dies ist an sich kein Problem, da fast alle V2X-OBUs über einen eingebauten Mobilfunk-Transceiver (LTE oder 5G) verfügen. Der Zugriff auf Mobilfunknetze erfordert jedoch typischerweise ein Abonnement und damit verbundene Gebühren für die Datenübertragung. Daher müssen viele Verkehrsbetriebe/Betreiber neue Wege und Mittel finden, um sowohl Prozesse als auch Budgets so zu gestalten, dass nicht nur die Investitionsausgaben (CAPEX) für die Beschaffung eines Systems, sondern auch die Betriebsausgaben (OPEX) für mobile Datennutzung berücksichtigt werden. Wir sehen in unserem täglichen Privatleben, dass mobile Internetnutzung fast zu einem Grundbedürfnis geworden ist. Diese Entwicklung macht vor dem Betrieb von schienengebundenem Nahverkehr keinen Halt. Diese Relevanz muss aber noch in vielen Betrieben, die CAPEX und OPEX bisher als zwei grundlegend unterschiedliche und voneinander unabhängige Themen behandelt haben, erkannt und akzeptiert werden.

7.3 Ausfall- und Verfahrenssicherheit

So wie CBTC niemals unter Berücksichtigung von Straßenkreuzungen, gemeinsam genutzten Fahrwegen oder GoA 0 entworfen und entwickelt wurde, ist V2X kein Sicherungssystem und wird es niemals werden. Wenn ATP erforderlich ist, muss V2X mit einem Zugsicherungssystem kombiniert werden – was jedoch nicht unbedingt CBTC bedeuten muss. Wenn GoA 1 ausreicht, d.h. sichere, kontinuierliche Geschwindigkeitsüberwachung und Sicherung von Gefahrenpunkten, gibt es mehrere punktförmige Alternativen zu CBTC, die eine bedarfsgerechte Leistung zu einem niedrigeren Preis bieten.

8 Ausblick und Fazit

Im August 2019 hat der VDV ein Positionspapier mit dem Titel „Betrieb autonomer Straßenbahnen“ herausgegeben, in dem er empfiehlt: „[...] einzelne Straßenbahnwagen in Analogie zu den Aktivitäten im Automobilbereich (V2X-Kommunikation) zu vernetzen und an die umliegende Straßeninfrastruktur anzubinden“.

Als einer der größten Automobilhersteller rüstet Volkswagen mehrere Modelle seiner Produktpalette standardmäßig mit V2X OBU aus.

Im Dezember 2022 startete die Autobahn GmbH, das für das Management von Autobahnen in Deutschland zuständige bundeseigene Unternehmen, eine Ausschreibung zur Ausstattung aller ihrer 1500 fahrbaren Absperrtafeln bis Ende 2023 mit V2X RSU, um herannahende Autofahrer vor gesperrten Fahrspuren, Geschwindigkeitsbeschränkungen oder Gefahren zu warnen, lange bevor die Baustelle in Sicht ist [11].

Es ist offensichtlich, dass sich die vernetzte Mobilität auf der Straße einschließlich des assistierten oder automatisierten Fahrens rasant

means of position determination, either with secondary train detection equipment, such as axle counters or track circuits, or using onboard systems like CBTC.

7.2 Cellular connectivity

A continuous data connection is required for DGPS and the advanced V2X functions. This is not an issue as such, since almost all the V2X OBU have a built-in cellular transceiver (LTE or 5G). However, access to cellular networks typically requires a subscription and associated fees for data transmission. Therefore, many transit agencies / operators need to come up with new ways and means of managing both processes and budgets to cover not only the capital expenditure (CAPEX) for procuring a system, but also the operating costs (OPEX) for data plans and network subscriptions for running the system. We can see in our daily private lives that data connectivity has become almost a basic need. This realisation still has to sink in and resound in many organisations which have so far treated CAPEX and OPEX as two fundamentally different and unrelated subjects.

7.3 Vital functions

Just as CBTC was never designed and developed with street intersections, shared right-of-way and GoA 0 in mind, V2X is not and will never become a safety system performing vital train protection functions. If ATP is required, the V2X must be combined with a vital train control system, which does not necessarily mean CBTC. If GoA 1 is sufficient, i.e. vital continuous speed supervision and protection against signals passed at danger, there are several intermittent alternatives to CBTC that provide sufficient performance for a lower price.

8 Outlook and conclusion

In August 2019, the VDV issued a position paper entitled The Operation of Autonomous Tramways in which it recommended that “single tramcars should be interconnected and connected to the surrounding road infrastructure by analogy to the activities in the automotive sector (V2X communication)”.

As one of the biggest car manufacturers, Volkswagen is equipping several models of their line-up with V2X OBU as a standard feature. In December 2022, Autobahn GmbH, the state-owned company responsible for managing motorways in Germany, launched a request for proposals to equip all its 1,500 trailer-based mobile road work signs with V2X RSU by the end of 2023 to warn approaching motorists of closed lanes, speed restrictions or hazards well before the road works are in sight [11].

It is plain to see that connected mobility on roads, including assisted or automated driving, is developing rapidly from fiction to fact. It is only a matter of time before we will see vehicles communicating with each other and with infrastructure and networks everywhere. As in the world of railways, where CBTC and ETCS with ATO have become commonplace, road traffic is facing the same trend, only with an even higher speed of adoption.

V2X makes it possible to use the comfort and convenience of a CBTC system to improve traffic and fleet management, increase efficiency, reduce delays, provide better and more accurate passenger information and ultimately also enhance safety on a light rail or tram system. This does not mean that V2X and CBTC are mutually exclusive. On the contrary, a combination of CBTC and V2X is highly attractive for light rail sys-

von Fiktion zu Realität entwickelt. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis überall Fahrzeuge untereinander und mit Infrastruktur und Netzwerken kommunizieren werden. Wie in der Eisenbahnwelt, wo CBTC und ETCS mit ATO alltäglich geworden sind, sieht sich der Straßenverkehr dem gleichen Trend gegenüber, nur mit einer noch höheren Umsetzungsgeschwindigkeit.

Mit V2X wird es möglich, den Komfort und die Bequemlichkeit eines CBTC-Systems zu nutzen, um das Verkehrs- und Flottenmanagement zu verbessern, die Effizienz zu steigern, Verzögerungen zu reduzieren, bessere und genauere Fahrgastinformationen bereitzustellen und letztendlich auch die Sicherheit in einem Stadtbahn- oder Straßenbahnsystem zu erhöhen. Dies bedeutet nicht, dass sich V2X und CBTC gegenseitig ausschließen. Für Stadtbahnssysteme, die sowohl GoA 1/GoA 2 in Kombination mit GoA 0 auf einer Linie oder in einem Netz benötigen, ist eine Kombination aus CBTC und V2X sehr attraktiv. Durch die exakte Abstimmung der Leistungs-, Funktions- und Sicherheitsanforderungen jedes Strecken- oder Netzabschnitts mit der jeweils passenden Ausrüstung werden wirtschaftlich und betrieblich beste Ergebnisse erzielt. Eine solche bedarfoptimierte Systemlösung stellt sicher, dass die Ausrüstung und die damit verbundenen Kosten optimiert werden, um genau die richtige Menge an Ausrüstung und Funktionalität nach Bedarf dort zu haben, wo sie benötigt wird.

Auch wenn Funktionen, die ein CBTC-System bietet, für den Straßenbahnbetrieb sehr interessant und nützlich sind, ist CBTC selbst aus normativer Sicht meist nicht erforderlich, aus kommerzieller Sicht nicht praktikabel und aus technischer Sicht nicht geeignet. Anstatt also blind CBTC für eine Straßen- oder Stadtbahn zu spezifizieren, ist es sinnvoll, zuerst die tatsächlichen Leistungs- und Sicherheitsanforderungen zu definieren und dann eine funktionale Spezifikation zu entwerfen, die CBTC-ähnliche Funktionen für die Datenkommunikation und Positionsbestimmung ohne eine sichere ATP dort, wo technisch und normativ machbar, ermöglicht.

Stadt- und Straßenbahnbetreiber müssen sich den technologischen Entwicklungen anpassen und mit ihnen Schritt halten, um Synergien nutzen, Investitions- und Lebenszykluskosten senken, die Zuverlässigkeit und Attraktivität ihrer Dienste verbessern und wettbewerbsfähig bleiben zu können.

Der Austausch mit und das Lernen von Erstanwendern wie VGF in Frankfurt könnte ein guter Ausgangspunkt für Betreiber sowie Planer, Berater, Behörden und Politiker sein, die bereit sind, moderne Technologie zu nutzen, um vernetzte Mobilität und ein ganzheitliches intermodales Verkehrsmanagement zu realisieren. Dies ist oft genug auch ohne CBTC möglich und sinnvoll: mit V2X zu einem Bruchteil der Kosten und der Ausrüstung, gänzlich ohne CBTC. ■

tems that require both GoA 1/GoA 2 combined with GoA 0 on one line or in one network. This will yield the best results in terms of economic and operating aspects by exactly matching the performance, functional and safety requirements of each section of a line or network with the corresponding best-fitting equipment. This demand-driven solution design ensures that equipment and the associated costs are optimised for just the right amount of equipment and functionality as needed.

While the functions offered by a CBTC system are important and desirable for street-running light rail systems, CBTC itself is most often not required from a normative point of view and is neither viable from a commercial viewpoint nor fitting from a technical perspective. As such, instead of blindly specifying CBTC for a street-running light rail, it makes sense to first define the actual performance and safety requirements and then to design a functional specification that allows CBTC-like functions for data communication and position determination without a secure ATP for street-running light rail systems.

Light rail and tram operators will need to adopt and keep up with the technological developments in order to be able to exploit the synergies, reduce investment and lifecycle costs, improve the reliability and attractiveness of their services and remain competitive.

Talking to and learning from early adopters like VGF in Frankfurt might be a good starting point for operators as well as for any planners, consultants, agencies and politicians willing to embrace state-of-the-art technology and make connected mobility and holistic intermodal traffic management a reality: potentially embracing the benefits of a CBTC system with only V2X at a fraction of the costs, equipment and system complexity. ■

LITERATUR | LITERATURE

- [1] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8691973>
- [2] <https://www.federalregister.gov/documents/2021/05/03/2021-08802/use-of-the-5850-5925-ghz-band>
- [3] <https://zeitmaschine.vgf-ffm.de/de/dtc>
- [4] <https://mainziel.de/projekte/mind-multimodales-reallabor-kooperative-mobilitaet>
- [5] <https://f.hubspotusercontent20.net/hubfs/3003125/Tram%20Signal%20Priority-Final%20Report-Feb%202020-summary.pdf>
- [6] <https://www.uestra.de/login-hannover/>
- [7] <https://www.v2x-priority.com/en/ulm-germany/>
- [8] <https://arxiv.org/abs/2006.02480>
- [9] https://docbox.etsi.org/workshop/2018/20180306_ITS_WORKSHOP/S01_CITS_STATUS_GLOBE/CITS_TAIWAN_ITRI_TAICS_TSENG.PDF
- [10] https://www.krri.re.kr/_prog/_board/?mode=V&no=70373&code=s-ub05_0501
- [11] <https://www.autobahn.de/cits/aktuelles/detail/kuenftig-noch-mehrsicherheit-an-tagesbaustellen>

AUTOR | AUTHOR

Carlsson Scholl

Business Development Manager

Siemens Mobility GmbH

Anschrift / Address: Nonnendammallee 101, D-13629 Berlin

E-Mail: carlsson.scholl@siemens.com