

Prüfverfahren zur Systemverifikation von Kollisionswarnsystemen für Straßenbahnen

Assistenzsysteme zur Kollisionsvermeidung für Straßenbahnen entlasten den Fahrzeugführer und erhöhen die Sicherheit für die Fahrgäste. Um Betreibern die Prüfung der Detektionsqualität des Systems im Alltagsverkehr zu erleichtern, hat die Bosch Engineering GmbH als Ergänzung der VDV-Richtlinie 191 ein kostengünstiges und einfach umsetzbares Prüfverfahren entwickelt, das mit wenig zusätzlicher Sensorik auskommt.



1. Einleitung

Fahrerassistenzsysteme, die vor Kollisionen warnen und im Notfall automatisch bremsen, halten zunehmend auch in Straßenbahnen Einzug. Seit dem Jahr 2016 wird das sogenannte Tram-Forward-Collision-Warning-System (TFCW-System) der Bosch Engineering im Fahrgastbetrieb eingesetzt. Es warnt den Fahrer bei einem erkannten Objekt im Detektionsbereich akustisch vor dem Hindernis und bremst die Bahn sogar automatisch bis zum Stillstand ab, wenn

der Fahrer auf die Warnung nicht oder zu spät reagiert. Unfälle können damit oftmals ganz vermieden oder zumindest ihre Folgen deutlich gemildert werden. Das System markiert einen entscheidenden Meilenstein für die Einführung moderner Assistenzsysteme in Straßenbahnen (Bild 1).

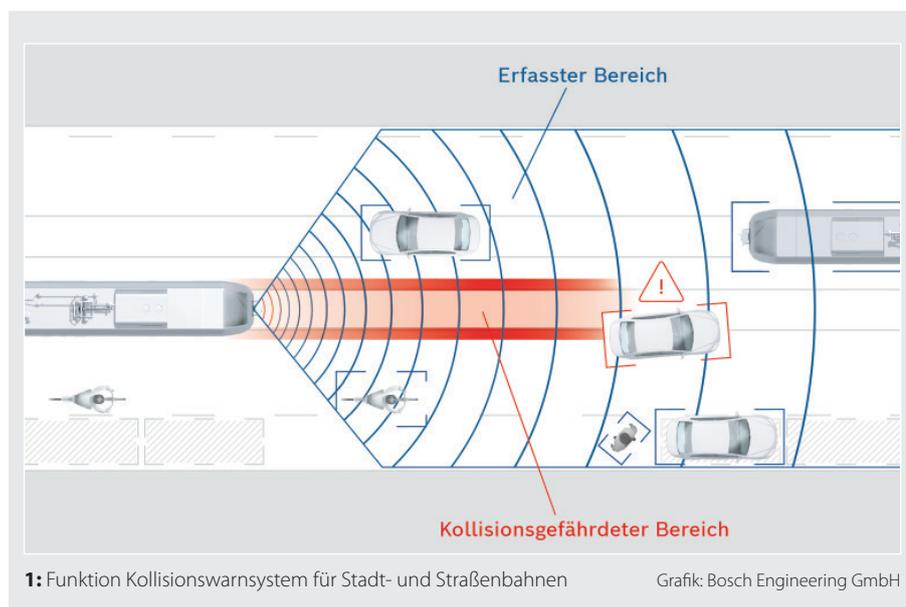
2. Technischer Systemaufbau

Das TFCW-System besteht aus einem Video- und einem Radarsensor sowie einem kompakten Steuergerät mit flexiblen



Ruprecht Anz

Systementwickler,
Bosch Engineering GmbH,
Abstatt
E-Mail ??????????????



Schnittstellen, die eine einfache Integration in unterschiedlichste Fahrzeuge ermöglichen. Die TFCW-Komponenten stammen aus dem bewährten Großserienbaukasten des Automobilbereichs von Bosch. Während der Fahrt erfasst die Videokamera den Schienenverlauf bis zu 120 Meter vor der Bahn. Anhand dieser Informationen ermittelt das System den kritischen, vom Radar zu überwachenden Raum. Mit einem Öffnungswinkel von bis zu 70 Grad detektiert der Radarsensor diesen Bereich und misst zudem Abstand und Geschwindigkeit zu vorausfahrenden Autos, Bussen und anderen Straßenbahnen. Neben beweglichen Hindernissen erkennt der Radar auch feststehende Objekte, zum Beispiel Prellböcke. Aus der Fusion beider Sensorinformationen wird ein detailliertes Bild der Umgebung erzeugt und um weitere Parameter, beispielsweise die Eigengeschwindigkeit der Bahn ergänzt. Ermittelt das System daraus eine kritische Annäherung, warnt es den Fahrer akustisch. Reagiert der Straßen-

bahnfahrer innerhalb des vorgegebenen Zeitraums von ca. ein bis zwei Sekunden nicht auf das Signal, bremst das System die Bahn bis zum Stillstand ab. Der Fahrer kann die Bremsung deaktivieren oder jederzeit die Verzögerungsleistung verstärken, wenn sich eine kritische Situation zuspitzt. Er wird damit bei seiner Fahraufgabe erheblich entlastet, nicht allerdings davon entbunden (Bild 2).

3. Systemverifikation gemäß VDV 191

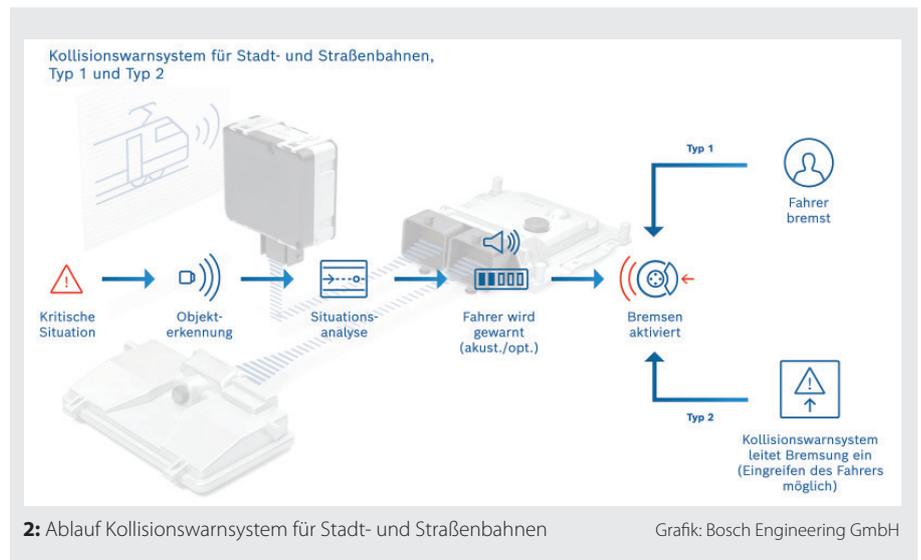
Um die Verkehrsunternehmen mit Straßen- und Stadtbahnbetrieb zu unterstützen, gibt der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) in der Schrift 191 Hinweise zur erforderlichen technischen Spezifikationen der Assistenzsysteme und zu den Verfahren für die Zulassung und Abnahme vor Inbetriebnahme [1]. Die VDV-Schrift 191 unterscheidet dabei zwischen der Inbetriebnahme nach BOStrab und der Abnahme nach BGB.

Da der Straßenbahnfahrer die Funktion des TFCW-Systems jederzeit überblenden kann und damit die Hoheit über die Fahrfunktion behält, ist es im Sinne der BOStrab nicht als sicherheitsrelevant einzuordnen. Es muss lediglich sichergestellt werden, dass das System korrekt ins Fahrzeug integriert ist und die anderen Fahrzeugfunktionen, insbesondere die Bremse, nicht beeinträchtigt. Vor der erstmaligen Inbetriebnahme bei einer Fahrzeugbaureihe ist daher eine Typprüfung zum Nachweis der ordnungsgemäßen Funktion erforderlich. Für die einzelnen Fahrzeuge der Baureihe reicht dann ein reduzierter Prüfumfang gemäß Vereinbarung zwischen Hersteller, Betreiber und Technischer Aufsichtsbehörde (TAB) aus.

Für die eigentliche Funktionsverifikation des TFCW-Systems ist die Prüfung nach BGB maßgebend. Während es zur Inbetriebnahme nach BOStrab im Anhang A der VDV-Schrift 191 einen sehr konkreten und bereits in der Praxis bei verschiedenen Projekten bewährten Testplan gibt, wird dieser für die Abnahme nach BGB nur grob skizziert:

- 1. Stufe: reproduzierbare Prüfung auf einem definierten Testgelände mit Prüfkörper-Auffahrt- und -Vorbeifahrttests
- 2. Stufe: Prüfung im Betrieb auf einer spezifischen Strecke im Streckennetz

Zudem verweist die VDV 191 auf die Möglichkeit zusätzlicher Testspezifikationen ge-



2: Ablauf Kollisionswarnsystem für Stadt- und Straßenbahnen

Grafik: Bosch Engineering GmbH

mäß Absprachen zwischen Auftraggeber und Systemhersteller.

4. Probleme bei Tests der Detektionsqualität

Die fehlende Spezifikation des Prüfaufbaus der BGB-Tests stellt sowohl Betreiber als auch Hersteller der Assistenzsysteme bei der konkreten Umsetzung vor Herausforderungen. Es bleibt letztlich den beiden Partnern überlassen, eine geeignete Prüfmethodik zu definieren. Dabei muss zwischen den beiden Stufen der BGB-Prüfung unterschieden werden. Mit der Stufe 1 soll die grundsätzliche Funktionstüchtigkeit des Systems nachgewiesen werden, dazu ist ein einfacher Testaufbau mit einem Prüfkörper ausreichend. Die Stufe 2 dient dazu, die Detektionsqualität im normalen Fahrbetrieb zu ermitteln. Eine hohe Detektionsqualität zeichnet sich durch eine große Anzahl erkannter sicherheitsrelevanter Objekte im Detektionsraum bei gleichzeitig möglichst wenigen Fehlwarnungen aus. Generell steht die Rate der vom System richtigerweise erkannten Hindernisse in direkter Wechselwirkung zur Zahl der Fehlwarnungen: Je mehr Objekte das System als mögliche Unfallquelle erkennt, desto mehr Fehlwarnungen meldet es auch. Jede Applikation stellt somit immer einen Kompromiss zwischen möglichst hohem Nutzen und akzeptabler Fehlerrate dar. Für die Spezifikation eines Abnahmetests müssen beide Faktoren berücksichtigt und gegeneinander abgewogen werden. Damit ergeben sich erheblich höhere Anforderun-

gen an Konfiguration, Durchführung und Interpretation der Prüfreihe. Wie Erfahrungen aus verschiedenen Projekten der vergangenen Jahre gezeigt haben, tauchen dabei zwei Probleme besonders häufig auf: einerseits ungeeignete Testszenarien, andererseits nicht repräsentative Prüfkörper.

4.1. Ungeeignete Testszenarien

Der Standardaufbau der BGB-Prüfungen besteht aus Auffahr- bzw. Vorbeifahrttests auf einem abgesperrten Testgelände. Damit lässt sich die grundsätzliche Funktionstüchtigkeit des Systems ermitteln, allerdings ist der Testaufbau für weiterführende Untersuchungen der Detektionsqualität ungeeignet. Die Realität komplexer und unübersichtlicher Verkehrssituationen, bei denen sich beispielsweise mehrere Objekte gleichzeitig mit jeweils unterschiedlichen Geschwindigkeiten und in verschiedenen Entfernungen im Detektionsraum bewegen, wird auf diese Weise nicht abgebildet. So gewonnene Erkenntnisse haben keine Aussagekraft über die Systemperformance im Alltagsbetrieb der Straßenbahn. Daran ändert auch eine Variation der Prüfparameter, beispielsweise in Bezug auf die Fahrgeschwindigkeit, Abstand zum Hindernis oder Anzahl der Prüfkörper, nichts.

4.2. Nicht repräsentative Prüfkörper

Aus Sicherheitsgründen werden bei den Funktionstests echte Hindernisse wie Autos, andere Straßenbahnen oder Personen durch Prüfkörper simuliert. Diese Attrap-



3: Prüfkörper für Funktionstests

Foto: Bosch Engineering GmbH

pen können immer nur eine Annäherung an die Realität darstellen. Um repräsentative Aussagen zur Qualität der tatsächlichen Sensorfunktion machen zu können, müssen ihre physikalischen Eigenschaften denen eines echten Hindernisses so genau wie möglich entsprechen. Abhängig vom Messprinzip stellt dabei jeder Sensor spezifische Anforderungen an den Prüfkörper. So ist ein Radarsensor auf die Detektion von Gegenständen aus Metall ausgelegt, während sich eine Kamera auf die optische Anmutung des Testkörpers stützt. In der Praxis bedeutet das, dass Kameras eine auf einen Karton oder eine Kunststoffplane gedruckte Fahrzeugabbildung erkennen, während Radarsensoren auf diesen Prüfkörper nicht reagieren. Zwar werden auf dem Markt spezielle Prüfkörper angeboten, die ein Fahrzeughindernis sensorgerecht nachbilden, allerdings sind sie sehr kostenintensiv und werden deshalb aktuell von keinem Betreiber eingesetzt. Daher haben Prüfkörpertests in der Regel nur bedingte Aussagekraft bezüglich der Detektionsqualität und sind für Performancevergleiche von Systemen verschiedener Hersteller ungeeignet (Bild 3).

5. Zusätzliche Untersuchung der Detektionsqualität im Fahrbetrieb

Aufgrund der oben skizzierten Probleme hat Bosch Engineering eine zusätzliche

Testmethode erarbeitet, mit der Betreiber den Systemverifikationsprozess gemäß VDV 191 ergänzen und um Erfahrungen aus dem Alltagsbetrieb erweitern können. Bei verschiedenen kommunalen ÖPNV-Betreibern, beispielsweise in Frankfurt am Main, wurde dieses Konzept schon erfolgreich angewendet.

Für den Test wird nur ein Videobild aufgezeichnet, für das man allenfalls temporär eine zusätzliche Kamera innerhalb der Fahrerkabine auf dem Dashboard benötigt. Das Videobild der Kamera wird über eine längere Fahrstrecke zeitsynchron mit den durch die TFCW-Sensorik erkannten Objekten aufgezeichnet. Anschließend werden die Daten gesichtet und statistisch ausgewertet.

Alternativ lässt sich das Fahrzeug für den Zeitraum der Tests mit zusätzlichen Hochleistungssensoren ausstatten, die Messdaten parallel zum TFCW-System aufnehmen. Der Unterschied zum manuellen Verfahren besteht darin, dass der Abgleich der durch die Systeme detektierten Objekte (halb)automatisch erfolgen kann.

5.1. Ermittlung der Objekterkennungsrate

Die Objekterkennungsrate gibt an, wie viele Hindernisse, bezogen auf eine festgelegte Teststrecke, von den TFCW-Sensoren erkannt werden. Für die Auswertung werden sämtliche Objekte im Videofilm,

die in einem definierten Bereich vor der Bahn detektiert werden müssten, mit den Einträgen in der Objektliste des Kollisionsswarmsystems abgeglichen. Dabei erfolgt die Zählung unabhängig davon, ob sich die Objekte vor der Bahn bereits im kollisionsgefährdeten Bereich befanden oder sie schon außerhalb des Gefährdungsbereichs erkannt wurden. Wichtig ist einzig, dass sie vom TFCW-System erkannt wurden.

Es hat sich in der Praxis bewährt, einen schlauchförmigen Detektionsbereich zu betrachten, der einen Bereich von fünf Metern links und rechts der Bahn abdeckt und sich über eine Länge von 70 Metern nach vorne erstreckt. Der Umfang der Messung hängt von der angestrebten Genauigkeit bzw. Konfidenz ab. Zur Bewertung der Systemperformance wird die Objekterkennungsrate für bestimmte Verkehrssituationen im Rahmen einer Stichprobenanalyse ermittelt. Dabei lassen sich kritische Situation wie beispielsweise das Auffahren auf vorausfahrende Fahrzeuge bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten betrachten. Relevante Kennzahlen für die Erkennung von Fußgängern, Fahrradfahrern oder Gleisabschlüssen und anderen Hindernissen sind zudem ermittelbar. Die Datenerhebung sollte idealerweise verschiedene Tageszeiten (Sonne, Dämmerung und Nacht) abdecken. Bisherige Feldtests haben gezeigt, dass das TFCW-System eine hohe Detektionsrate in realen Verkehrssituationen aufweist.

5.2. Bestimmung der Fehlwarnungsrate

Eine Fehlwarnung, auch als False positive bezeichnet, liegt vor, wenn das TFCW-System eine Warnung/Bremmung auslöst, ohne dass sich ein Objekt oder eine Person im kollisionsgefährdeten Bereich befunden hat. Aufgrund der Wechselwirkung mit der Objekterkennungsrate sind Fehlwarnungen im Betrieb nach aktuellem Stand der Technik derzeit noch unvermeidlich. Allerdings sollte die Anzahl so gering wie möglich sein, denn eine niedrige Fehlwarnungsrate ist entscheidend für die Akzeptanz des Systems unter den Fahrbediensteten. Zu häufiges Warnen kann beispielsweise dazu führen, dass der Fahrer dem Signal bei einer tatsächlichen Gefahrsituation nicht ausreichend Beachtung schenkt. Unter psychologischen Gesichtspunkten gelten Fehlwarnungen im unteren einstelligen Bereich pro Arbeitsschicht als akzeptabel.

Für die Analyse der Fehlwarnungsrate muss während der Testfahrt parallel zum

Kollisionswarnsysteme sind ein wichtiger Stellhebel, um Unfälle im Straßenbahnverkehr zu vermeiden oder ihre Schwere zu mindern.



4: Komponenten Kollisionswarnsystem für Stadt- und Straßenbahnen

Foto: Bosch Engineering GmbH

Kamerabilddaten das CAN-Bus-Ausgangssignal des TFCW-Systems mit aufgezeichnet werden. Im Rahmen der Testauswertung wird dann jeder abgespeicherte Warnimpuls mit der Videoaufzeichnung abgeglichen. Auf dieser Basis bewertet das Testteam, ob die Warnung gerechtfertigt war oder nicht. Gezählt werden nur eindeutige Fehlwarnungen, also Systemreaktionen auf Objekte, die nach menschlichem Ermessen kein Hindernis darstellen. Für ausreichende statistische Konfidenz sollte die Teststreckenlänge mindestens 60 Kilometer, besser sogar mehr als 300 Kilometer betragen und sich über den gesamten Tag und die Nacht erstrecken. Das Geschwindigkeitsprofil sowie die Strecke sollten dem Fahrplanbetriebs entsprechen.

Die Ursachen für Fehlwarnungen sind sehr unterschiedlich und oftmals in der Infrastruktur des Betreibers begründet, sodass für dasselbe Kollisionswarnsystem auf unterschiedlichen Strecken differierende Ergebnisse zu erwarten sind. Betreiber sollten daher schon im Rahmen ihrer Projektspezifikation Tests mit einem oder mehreren Demonstratoren durchführen. Sofern die Einbaupositionen der Sensoren im Testfahrzeug mit der in der späteren Zielapplikation vergleichbar ist, kann mit einer ähnlichen TFCW-Performance der ausgerüsteten Fahrzeuge der Betreiber gerechnet werden (Bild 3).

6. Fazit

Die von Bosch Engineering vorgeschlagene Methodik zur Analyse der Detektionsqualität hat sich in der Praxis bewährt und liefert Betreibern wichtige Erkenntnisse über den Einsatz des TFCW-Systems im Alltagsbetrieb. Allerdings sollten Betreiber

den Kostenfaktor nicht aus den Augen verlieren, denn Performancetests verursachen generell einen erheblichen zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand. Insofern stellt sich die Frage, ob der gesamte Verifikationsprozess, insbesondere der Objekterkennungsprozess, auch bei künftigen Projekten jeweils komplett durchlaufen werden muss. Denn bei einer genügend großen Anzahl aufgezeichneter Sequenzen ist nicht davon auszugehen, dass die Erkennungsraten von Kraftfahrzeugen, Fahrrädern oder Personen zwischen verschiedenen Städten oder Betreibern differieren. Anders liegt der Fall bei unterschiedlichen Straßenbahnmodellen oder Gleisabschlüssen, deren Erkennungsmuster jeweils variieren können. Im Hinblick auf eine zeitlich und wirtschaftlich sinnvolle Verifikation sollte sich die Abnahme nach BGB daher künftig auf diese Szenarien konzentrieren.

7. Zusammenfassung

Kollisionswarnsysteme sind ein wichtiger Stellhebel, um Unfälle im Straßenbahnverkehr zu vermeiden oder ihre Schwere zu mindern. Die VDV-Schrift 191 gibt Betreibern zwar wichtige Hinweise zur technischen Spezifikationen und zum Abnahmeverfahren der Systeme, für die Prüfung der Detektionsqualität im Fahrbetrieb sind allerdings weitergehende Untersuchungen notwendig. Bosch Engineering hat eine ergänzende Testmethodik erarbeitet, mit der

Betreiber die Detektionsqualität des Kollisionswarnsystems im Alltagsbetrieb analysieren können. (Bild 4)

Literatur

[1] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (Hrsg.): Fahrerassistenzsysteme (FAS) für Straßenbahnen zur Kollisionsvermeidung mit direkt im Fahrweg befindlichen Hindernissen. VDV-Schrift 191, Köln: Beka-Verlag, 2019

Summary

Prüfverfahren zur Systemverifikation von Kollisionswarnsystemen für Straßenbahnen

Kollisionswarnsysteme sind ein wichtiger Stellhebel, um Unfälle im Straßenbahnverkehr zu vermeiden oder ihre Schwere zu mindern. Die VDV-Schrift 191 gibt Betreibern zwar wichtige Hinweise zur technischen Spezifikationen und zum Abnahmeverfahren der Systeme, für die Prüfung der Detektionsqualität im Fahrbetrieb sind allerdings weitergehende Untersuchungen notwendig. Bosch Engineering hat eine ergänzende Testmethodik erarbeitet, mit der Betreiber die Detektionsqualität des Kollisionswarnsystems im Alltagsbetrieb analysieren können.