



Foto: Siemens Mobility GmbH

Abb. 1: Die autonome Tram bei Testfahrten in Potsdam. Sie ist buchstäblich fahrerlos, denn der Fahrerarbeitsplatz ist nicht besetzt.

# Trams das Fahren lehren

Auf dem Weg zur smarten, autonomen Straßenbahn

Matthias Hofmann, Erlangen

**A**utomatisierter oder automatischer Betrieb von Bahnen in geschlossenen Systemen, wie etwa U-Bahnen mit komplett abgeschottetem Gleiskörper, findet bereits seit Jahrzehnten statt. Hier arbeiten Leitzentrale, Fahrzeug, Strecke und Bahnsteigüberwachung zusammen. Der autonome Betrieb in einer offenen Infrastruktur, wie sie bei der Straßenbahn im Stadtverkehr der Normalfall ist, erfordert jedoch ganz andere Technologien. Ein autonomes Fahrzeug muss ebenso wie ein menschlicher Fahrer mit seiner Intuition und Erfahrung die komplexesten Situationen zuverlässig erkennen, intelligent bewerten und selbstständig darauf reagieren. Dabei ist die größte Herausforderung, dass die Technik im Fahrzeug Kollisionen mit den sich im gemeinsamen Verkehrsraum befindenden ande-

ren Verkehrsteilnehmern, wie Fußgänger, Zweiradfahrer und Autos, sicher vermeiden muss.

## Erprobung der ersten autonom fahrenden Straßenbahn in Potsdam

Die ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH ist seit den 1990er-Jahren Kunde von Siemens und stellte einen Combino zur Verfügung, der für die Erprobung des autonomen Fahrens mit einer Vielzahl von Sensoren und Rechnern bestückt wurde. Im Rahmen der Innotrans 2018 präsentierten beide Unternehmen diesen weltweit ersten Forschungsprototypen einer autonomen Tram der Öffentlichkeit. Das Ziel des gemeinsamen Entwicklungsprojekts ist es, die technologischen Herausforderungen des autonomen Fahrens unter re-

alen Einsatzbedingungen zu erfassen und Lösungsansätze dafür zu entwickeln und zu testen.

Verschiedene Kameras an der Front und den Seiten erkennen vorher antrainierte Objekte, zum Beispiel Menschen in den verschiedensten Positionen, sowie Signale und Signalzustände. Die Informationen der Kameras werden mit den Daten von drei nach vorn gerichteten Radar-Detektoren und drei Lidar-Scannern ergänzt. Die reflektierten Radarwellen identifizieren metallene Objekte wie Autos und andere Straßenbahnen, außerdem werden die Geschwindigkeit und die Entfernung dieser Objekte berechnet. Die Lidar-Scanner erfassen das Umfeld um den Kopf des Combino in einem Winkel von 270° und errechnen ein dreidimensionales Abbild der Umgebung mit exakter Positionierung aller Objekte.

## „Digitale Augen“ und ein „Gehirn“ aus Algorithmen

Die Sensoren sind somit die „digitalen Augen“ der Straßenbahn. Ihre Daten werden zu einem hochgenauen Abbild der Umgebung kombiniert, in dem jeder Verkehrsteilnehmer mit seiner genauen Position und seiner Bewegungs-Trajektorie erfasst ist.

Komplexe Algorithmen auf Hochleistungsrechnern sind das „Gehirn“ der Straßenbahn. Sie bewerten die aktuelle Verkehrssituation, prognostizieren, wie sich diese verändern wird und treffen die richtigen Entscheidungen. Diese werden dann durch die Aktuatoren – Klingel, Antrieb, Steuer-elektronik und Bremssystem des Combino – ausgeführt.

Auf einem 13 km langen Streckenabschnitt des Potsdamer Straßenbahnnetzes lernte das Fahrzeug, sich im Straßenverkehr zu bewegen und auf Hindernisse im Fahrweg und Signale vorausschauend zu reagieren. Es werden die vorgegebenen Geschwindigkeitsvorgaben exakt umgesetzt und die Tram hält zentimetergenau an Bahnsteigen und fährt selbständig wieder los. In kritischen Situationen – zum Beispiel bei kreuzenden Fußgängern oder Fahrzeugen, aber auch zu nah am Gefahrenprofil stehenden Menschen – werden die Verkehrsteilnehmer durch die Klingel gewarnt. Bleiben die Personen im Gleisbereich, bremst die Tram rechtzeitig bis zum Stillstand ab be-



### Zum Autor

**Matthias Hofmann** ist Produkt Portfolio Manager für Straßen- und Stadtbahnen bei Siemens Mobility und seit 2015 verantwortlich für das Entwicklungsprogramm für assistiertes und autonomes Fahren von Straßenbahnen. Seit 1994 ist er bei Siemens in verschiedenen Positionen im Bereich Light Rail tätig, darunter internationaler Vertrieb, Angebotsleitung und Projektmanagement.

ziehungsweise beschleunigt wieder, wenn keine Kollisionsgefahr mehr besteht. Ein Sicherheitsbegleiter ist bei den Testfahrten immer an Bord, um in Notfällen einzugreifen.

Das Versuchsfahrzeug funktioniert hier bereits sehr zuverlässig, ohne nennenswerte Zwischenfälle und bei einer Fahrleistung im Testbetrieb von bereits über 10.000 km. Es konnte nachgewiesen werden, dass autonomes Fahren in einer offenen Infrastruktur grundsätzlich realisierbar ist und die verfügbare Technologie aus der Automobilindustrie hierfür eine gute Basis bildet. Dank der täglichen Erfahrungen im echten Stadtverkehr wird die Technologie immer weitergehend für das autonome Fahren „trainiert“. Allerdings hat es sich auch gezeigt, dass autonomes Fahren nach Grade of Automation (GoA) 4, also ganz ohne Begleitperson an Bord, noch viele Jahre Entwicklungsarbeit erfordert, weil noch wesentliche technische Herausforderungen zu lösen sind. Insbesondere die unter allen Sicherheitsaspekten

korrekte Bewertung auch der komplexesten Verkehrsszenarien – beispielsweise in einer Fußgängerzone oder an unübersichtlichen Kreuzungen – ist hier zu nennen. Aber auch die juristischen Grundlagen wie Zulassungs- und Haftungsfragen sind längst noch nicht geklärt. Nur wenn die technische Entwicklung und die Definition der rechtlichen Rahmenbedingungen Hand in Hand gehen, kann eine für die Zertifizierung geeignete Technologie entwickelt werden.

### Automatisiertes Fahren im Betriebshof

Auf der Suche nach wirtschaftlich sinnvollen Automatisierungsprozessen, die in einem weniger komplexen Umfeld in absehbarer Zeit realisierbar sein könnten, kristallisierte sich das vollautomatisierte Straßenbahndepot heraus, welches auf Basis von fahrerlosen Trams betrieben wird. Anders als in einem chaotischen urbanen Umfeld mit verschiedenen und nicht immer vorhersehbar und regeltreu ver-

ANZEIGE

# GSP

a televic company

Mobilität neu denken –  
Fahrgastinformation mit Mehrwert

Von CCTV über FIS bis TFT-Displays:  
Zuverlässige Systeme für Ihre  
Fahrzeuge aus einer Hand.

Jetzt mehr erfahren:  
Einfach QR-Code scannen oder  
[www.gsp-berlin.de](http://www.gsp-berlin.de)

Grafik: Siemens Mobility GmbH



Abb. 2: Der Forschungsprototyp einer smarten, autonomen Straßenbahn meistert im Potsdamer Straßennetz alle wesentlichen Fahraufgaben.

haltenden Verkehrsteilnehmern besteht ein Straßenbahndepot in der Regel aus einer eingezäunten, abgetrennten Fläche, auf der sich nur Mitarbeiter oder unterwiesene Besucher bewegen. Schienenfahrzeuge rollen hier ohne Fahrgäste an Bord im Schritttempo oder bis maximal 25 km/h, was das Unfallrisiko weiter senkt.

### Effizienzsteigerung durch Automatisierung der Depotprozesse

Das sind die idealen Voraussetzungen für die kommerzielle Anwendung einer ersten Automatisierungsstufe mit Potenzial für die Reduzierung des Personalaufwands bei regelmäßig wiederkehrenden Aufgaben wie Besanden, Waschen und Wartung. Wenn die Fahrzeuge automatisiert auf- und abgerüstet und bereitgestellt würden, könnten lange Wege des Personals und Zeit eingespart werden. Die Fahrt durch die Sand- und Waschan-

lage, zur Werkstatt und zum Abstellplatz erfordert ebenfalls Personal, das im Linienebetrieb dringender gebraucht würde. Entsprechend könnten Fahrzeuge und Personal effizienter im Passagierbetrieb eingesetzt werden.

Viele dieser Prozesse, so die Vorstellung der ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH und der Experten von Siemens Mobility, könnten automatisiert und von einem zentralen Steuerungs-System angestoßen und überwacht werden. Auch in Gesprächen mit anderen Verkehrsbetrieben bestätigte sich das Potenzial für ein vollautomatisiertes Depot, um die Fahrt- und Standzeiten der Straßenbahnen zu optimieren und die Waschanlage und Werkstatt/Anlagen gleichmäßiger auszulasten.

Eine erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Basis der Zeit-Analysen der Rangierprozesse und Abläufe im Potsdamer Tram-Depot ergab für eine Automatisierung der

Depotprozesse ein attraktives Kosten-/Nutzen-Verhältnis und veranlasste Siemens und ViP, diesen Anwendungsfall weiter zu untersuchen.

### Das AStriD-Projekt

Zusammen mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), dem Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität (IKEM) und der Codewerk GmbH wurde daraufhin im Oktober 2019 das Forschungsprojekt mit dem Namen AStriD („Autonome Straßenbahn im Depot“) gestartet. Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur fördert das Vorhaben im Rahmen der Förderrichtlinie Modernitätsfonds „mFUND“. Die Umsetzung erfolgt auf dem Betriebshof des Verkehrsbetriebs Potsdam. Ziel ist die Entwicklung eines digitalen Betriebshofes auf Basis einer autonom fahrenden Tram. Die technische Machbarkeit wird mit autonomen Servicefahrten, beispielsweise

Fotos: Siemens Mobility GmbH



Abb. 3 und 4: Die Automatisierung von typischen Depotprozessen, wie etwa das Waschen der Fahrzeuge, ermöglicht eine Reduzierung des Personalaufwandes und eine effizientere Ausnutzung der Anlagen.

durch eine Waschanlage zu einem Abstellgleis demonstriert.

Die Partner haben das Projekt in verschiedene Arbeitspakete unterteilt. Die Siemens Mobility GmbH realisiert die autonom fahrende Tram im Depot, die über den Data-Hub vom Partner Codewerk in die Daten- und Systemlandschaft eingebunden ist und sich auf Basis einer digitalen Karte, die ebenfalls von Siemens und in Zusammenarbeit mit dem KIT entwickelt wird, lokalisiert. Die ViP stellt das Fahrzeug und die Depot-Infrastruktur zur Verfügung, sie ermöglicht den Zugang zu den benötigten Daten, Systemen und Anlagen und bewertet die Ergebnisse aus Sicht eines Depotbetreibers. Das Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) des KIT bringt die Expertise zur Spezifikation und Digitalisierung der Betriebshöfe, der Automatisierung von Prozessen und der Identifikation der dafür benötigten Daten ein. Das IKEM analysiert und bewertet die rechtlichen und ökonomischen Fragestellungen im Rahmen des Projekts.

### Digitale Verknüpfung zu einem Gesamtsystem

Als zentrales Element wird ein übergeordnetes Betriebshof-Managementsystem benötigt. Dieses disponiert die anstehenden Depot-Prozesse und steuert zur Umsetzung die angebotenen Systeme, also Fahrzeuge und stationäre Anlagen, wie zum Beispiel Waschanlage und Hallentore aus. Dazu muss es die Positionen aller Straßenbahnen, den Ist-Zustand der Infrastruktur sowie die Stellung von Signalen und Weichen kennen.

Damit eine Straßenbahn nach einem Fahrauftrag des Betriebshof-Managementsystems selbstständig und ohne Fahrer durch die Positionen und Stationen des Depots fahren kann, müssen alle Elemente miteinander digital vernetzt sein und kommunizieren können. Das Netz muss eine sichere, redundant und gegen Angriffe immune Datenübertragung gewährleisten und das ganze Gelände zuverlässig abdecken. Eine Notabschaltung muss praktisch überall und jederzeit verfügbar sein, ebenso Rückfallebenen beim Versagen von Fahrzeugen, Anlagen und Weichen. Dafür sind Notfallszenarien einzuplanen. Auch die rechtlichen Voraussetzungen für die Zulassung und den Betrieb im geschützten Bereich müssen erarbeitet werden.

### Hochgenaue Lokalisierung – auch in der Halle

Als wichtige Voraussetzung für den autonomen Betrieb des Fahrzeuges hat sich bei den vorausgegangenen Testfahrten eine hochgenaue Lokalisierung herausgestellt. In Hallen sind aber herkömmliche GPS-Signale nur unzureichend zu empfangen, so dass eine autonome Straßenbahn auf dieser Technologiebasis nicht ausreichend lokalisierbar ist. Die auf 5 cm genaue Lokalisierbarkeit ist aber unter allen Betriebsbedingungen erforderlich und nur mit alternativen Ansätzen erreichbar, an denen bereits gearbeitet wird. Hier sind neben der Auswertung der Sensordaten auch Kombinationen mit Funktechnologien oder anderen infrastrukturbasierten Hilfsmitteln denkbar. Voraussetzung für einen sicheren Betrieb ist außerdem die Verfügbarkeit von dynamischen, hochgenauen digitalen Karten.

### Die Sensorik muss bei allen Witterungsbedingungen funktionieren

Für das autonome Fahren der Tram muss auch unter erschwerten Sichtbedingungen wie Schnee, Nebel, Starkregen und selbstverständlich auch Dunkelheit die sichere und zuverlässige Umfelderkennung und Hindernisvermeidung sichergestellt sein. Dazu müssen weitere Sensortechnologien erprobt werden und ein geeignetes Set-up ausgewählt werden.

### Juristische und wissenschaftliche Handlungsfelder

Neben den informationstechnischen Herausforderungen und Voraussetzungen für einen prototypisch realisierten autonomen oder automatischen Betrieb müssen die weiteren wissenschaftlichen und juristischen Handlungsfelder definiert werden.

### Bewertung der Automatisierungsstufen im Depot

Zunächst stellt sich aber die Frage, welche der weiter oben genannten Prozesse wie Instandhaltung, Rangierbewegungen, Besanden, Waschen, Fahrzeugbereitstellung et cetera automatisierbar sind – und mit welchem wirtschaftlichen Nutzen. Was ist für diese Automatisierung technisch, logistisch und juristisch nötig und zu beachten? Welcher technische Aufwand ist erforderlich, um die Automatisierungslösungen fahrzeugseitig und in der Infrastruktur umzusetzen, vor allem im Hinblick auf die Nachrüstung der vorhandenen Fahrzeuge?

Das Betriebshofgelände der ViP in Potsdam, Werkstattpersonal, Fahrer und das Versuchsfahrzeug der autonomen Straßenbahn sind die Basis für die Identifikation von Prozessen, die sich für die prototypische Erprobung eignen. Da kein Depot dem anderen gleicht, sollen die Ergebnisse grundsätzlich auf „digitale Depots“ übertragbar sein.

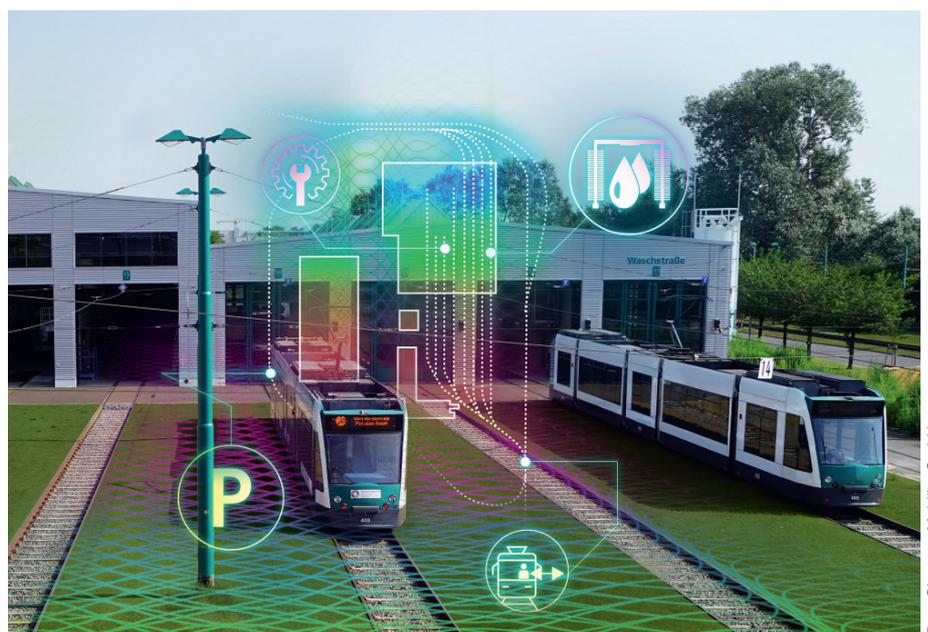


Abb. 5: Im AStrID-Projekt wird der automatisierte Betriebshof mit autonom fahrender Tram und umfassender datentechnischer Vernetzung prototypisch umgesetzt und demonstriert.

Foto: Siemens Mobility GmbH

Grafik: Siemens Mobility GmbH

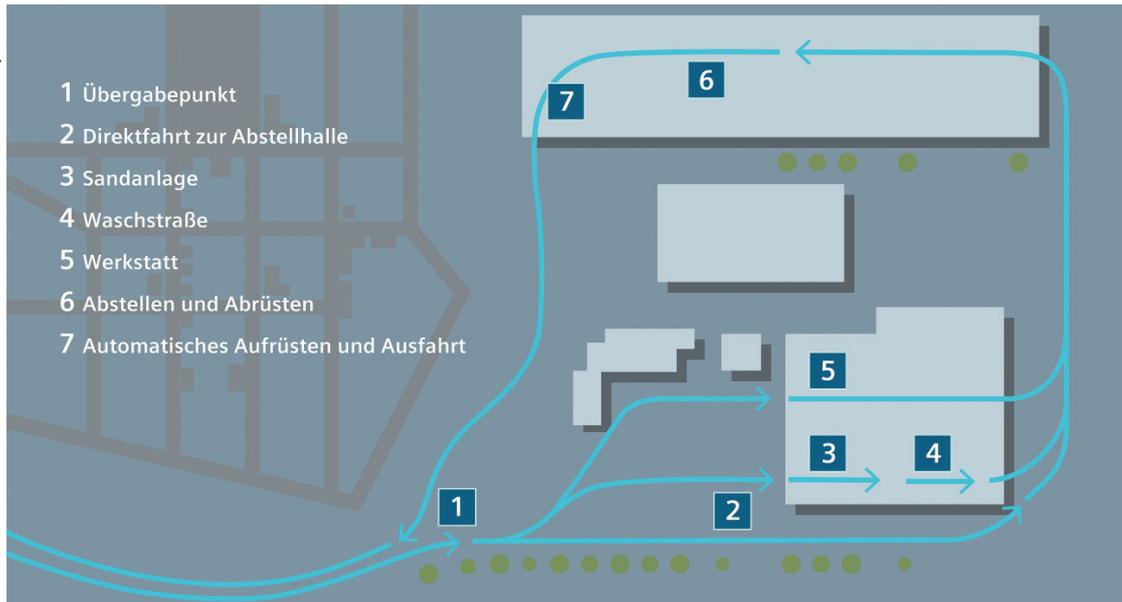


Abb. 6: Der Demonstrator zeigt im Betriebshof der ViP Potsdam die Automatisierung der typischen Depotabläufe.

### Demonstrator zeigt die Automatisierung der typischen Abläufe

Zum Abschluss des bis Ende 2022 laufenden Projektes soll das autonome Fahrzeug, wenn es vom Linienbetrieb kommt und der Fahrer ausgestiegen ist, entweder selbstständig direkt in die Abstellhalle fahren oder Sandanlage und Waschanlage durchlaufen, gegebenenfalls zur Werkstatt fahren und sich anschließend abstellen und abrüsten. Zu Betriebsbeginn rüstet sich das Fahrzeug automatisiert wieder auf, stellt sich bereit und kann vom Fahrer ohne Zeitverzug für den Passagierbetrieb übernommen werden.

Gezeigt werden soll, wie die Straßenbahn in Daten- und Systemlandschaft eingebunden ist. Das Depot-Managementsystem definiert die Fahraufträge und sendet die Befehle an die Tram und die Waschanlage.

Das Betriebshof-Stellwerk stellt die angeforderte Fahrstraße für die Tram, die autonom die Fahraufträge abwickelt.

Zur Realisierung der autonomen Fahrt muss die Straßenbahn auf der Strecke und die Szenarien angelernt werden, sich mittels der digitalen Karte exakt lokalisieren, und mit Hilfe künstlicher Intelligenz Hindernisse erkennen und so Kollisionen vermeiden.

### Erste Ergebnisse liegen vor

Die bisherigen Erkenntnisse aus der Analyse der Ist-Prozesse und die Fortschritte in der Umsetzung des Demonstratorbetriebes sind erfolgversprechend. Das gewonnene Know-how kann so schon heute in die Planung von neuen Straßenbahndepots und Abläufe in digital vernetzten Betriebshöfen einfließen und damit den Grundstein für eine vollumfassende

Depotautomatisierung legen. AStriD ist somit der nächste große Meilenstein auf dem Weg zur autonom fahrenden Straßenbahn. Mit der Automatisierung von zeitintensiven Rangierprozessen im Betriebshof wird Siemens Mobility die Straßenbahn-Betreiber in Zukunft noch besser dabei unterstützen, eine nachhaltige Wertsteigerung über den gesamten Lebenszyklus sicherzustellen sowie Verfügbarkeit zu garantieren.

Autonomes Fahren nach GoA 4 bei höheren Geschwindigkeiten und in hochkomplexen städtischen Umfeldern bleibt natürlich weiter das Ziel, doch dies hängt vom Fortschritt der Weiterentwicklung der von der Autoindustrie genutzten Sensortechnologie ab, auf welche die Bahnindustrie angewiesen ist. Die Erprobung der autonomen Tram in Potsdam wird fortgesetzt, um weitere Erkenntnisse zu gewinnen und die Zulassungsanforderungen zu klären.

## Zusammenfassung/Summary

### Trams das Fahren lehren

Der Weg zur intelligenten Straßenbahn führt über mehrere Stufen. Seit 2017 erprobt Siemens Mobility dazu bei der ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH eine autonom fahrende Straßenbahn in echter Verkehrsumgebung – live demonstriert im Rahmen der Innotrans 2018. Nun rückt die Automatisierung des Betriebshofes auf Basis von fahrerlosen Trams als erster kommerziell nutzbarer Schritt in den Fokus. Ziel ist es, zeitintensive Rangierprozesse, wie zum Beispiel Servicefahrten durch die Waschanlage zu automatisieren und damit die Kapazität des Depots flexibler zu nutzen. Das Projekt trägt den Namen AStriD „Autonome Straßenbahn im Depot“ und wird vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen der Förderrichtlinie Modernitätsfonds „mFUND“ gefördert.

### Teaching trams to drive

The smart tram can only be realized in stages. For this purpose, Siemens Mobility has been testing an autonomously driving tram in real traffic environment on the network of ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH since 2017. Depot automation is now the focus as the first commercially useful step of autonomous tram driving. Target is the automation of time-consuming shunting operations in the depot, such as running trams through a washing plant, enabling a more flexible use of the depot capacity. The project, called “AStriD” (Autonomous Tram in Depot), is being funded by the Federal Ministry for Transportation and Digital Infrastructure (BMVI) as part of its „Modernity Fund” (mFUND) research initiative.