

Automatisiertes Fahren

Infrastruktur für eine automatisierte Buslinie

Erfahrungen aus dem Testzentrum für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg (TaBuLa)

Im Projekt TaBuLa wurden die Akzeptanz und die Einsatzmöglichkeiten automatisierter Busse im ÖPNV unter realen Bedingungen mit Fahrgästen und im Mischverkehr mit anderen Verkehrsteilnehmenden untersucht. Dazu wurden automatisierte Minibusse in der technisch höchst anspruchsvollen Testumgebung der schleswig-holsteinischen Kleinstadt Lauenburg/Elbe von Juni 2018 bis November 2021 als Ergänzung der bestehenden Buslinien betrieben.

Die beiden Projektpartner Technische Universität Hamburg (TUHH) und Kreis Herzogtum Lauenburg wurden dafür mit 3,7 Millionen Euro durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur im Rahmen der Förderrichtlinien

„Automatisiertes und vernetztes Fahren“ und „Ein zukunftsfähiges, nachhaltiges Mobilitätssystem durch automatisiertes Fahren und Vernetzung“ gefördert. Insgesamt wurden im Laufe des Projektes rund 300.000 Euro für die Ertüchtigung

der technischen Infrastruktur ausgegeben. Als Infrastruktur werden die Verkehrsanlagen und -technik sowie Energie- und Kommunikationsversorgung definiert.

Strecke und Fahrzeuge

Die im Projekt befahrene innerörtliche Ringlinie als Verbindung zwischen Alt- und Oberstadt weist vielfältige Herausforderungen auf, die in dieser Zusammensetzung für die Erprobung automatisierter Technik einmalig sind. Im Streckenverlauf befindet sich u. a. eine vielbefahrene Bundesstraße mit zwei Lichtsignalanlagen, ein verkehrsberuhigter Bereich mit touristisch hoher Frequenz zu Fuß Gehender, verschiedene Fahrbahnbeläge mit großen Abschnitten Großsteinpflaster, schmale und steile Altstadtgassen (Breite 2,7 m bei einer Steigung von 17 %) und ein bewaldeter Abschnitt sowie eine Straßenüber- und Unterführung. Alle Streckenabschnitte sind auf eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h begrenzt.

Die beiden im Testzentrum betriebenen Minibusse des Typs ARMA DL4 4WD vom Hersteller NAVYA sind als „People Mover“ für den ÖPNV zugelassen und bieten bis zu zehn Personen und der fahrzeuggesteuernde Person Platz. Die Fahrzeuge sind 2,10 m breit, 4,78 m lang und haben eine zulässige Gesamtmasse von 3,45 t. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 18 km/h. Das Automatisierungslevel gemäß SAE International kann in Lauenburg als „Bedingte Automatisierung“ (SAE-Level 3) eingeordnet

Schmalster und steilster Streckenabschnitt vor einem Knotenpunkt in Lauenburg/Elbe



Die beiden TaBuLaShuttle an der Haltestelle Lauenburg/ZOB



werden. Die Fahrzeuge fahren auf rund fünf Kilometern „virtuellen Schienen“ im Straßennetz automatisiert und dürfen im gesamten Stadtgebiet Lauenburgs manuell gefahren werden. Mit jeweils zwei Elektromotoren und einer Lithium-Eisenphosphat-Batterie mit 33 kWh Kapazität können die Fahrzeuge je nach Außentemperatur und Streckenanforderungen sechs bis zwölf Stunden Fahrtrieb gewährleisten. Eine fahrzeugbegleitende Person ist rechtlich und technisch notwendig, um z. B. bei herannahenden Rettungsfahrzeugen mit Wegerechten reagieren zu können.

Allgemeine Infrastruktur

Für den Ladeprozess, Schutz vor Vandalismus und die Lagerung von notwendigem Equipment wurde eine 65 m² große beheizte Halle zzgl. Sanitärräumen angemietet, zu der ein neuer 100A-Stromanschluss gelegt wurde. Mit einer naheliegenden Tankstelle und einem Handwaschplatz sowie einer örtlichen Kfz-Werkstatt und einem 4-Punkt-Lift wurden Verträge geschlossen.

Beschilderung und Markierung

Um die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmenden auf die möglichen Besonderheiten eines Testfeldes für automatisiertes Fahren zu erhöhen, wurde

auf den zuführenden Straßen ein Gefährdungswarnzeichen mit Zusatzzeichen installiert, das vom zuständigen Ministerium genehmigt und der Unteren Verkehrsbehörde angeordnet wurde (vgl. Abbildung).

Die automatisierten Fahrzeuge befahren eine virtuelle Schiene. Hindernissen auf diesem programmierten Fahrweg können die Fahrzeuge aktuell noch nicht ausweichen. Aufgrund des hohen Parkdrucks im Bedienungsgebiet wurde zur Gewährleistung eines reibungslosen Verkehrsablaufes aller Verkehrsteilnehmenden die Parksituation deshalb geordnet. Dazu wurden mittels gelber oder weißer Fahrbahnmarkierung Parkstände eindeutig zugewiesen oder auch Absolute Halteverbote angeordnet. Aufgrund geringer Akzeptanz von obligatorischen Halteverboten in Knotenpunkten oder schmalen Fahrbahnen bestand die Notwendigkeit die Verbote durch zusätzliche Verkehrszeichen hervorzuheben.

Die automatisierten Fahrzeuge nehmen 2,7 bis 3,0 m Fahrbahnbreite in Anspruch unter Berücksichtigung der Fahrzeugdimension zzgl. des notwendigen Sicherheitsraumes von mindestens 0,3 m um das Fahrzeug herum. In einem Straßenabschnitt betrug die vorhandene Fahrbahnbreite im Zweirichtungsverkehr

fünf Meter, womit die benötigte Breite im Begegnungsfall nicht gewährleistet werden konnte. Um ein wiederkehrendes Halten der automatisierten Fahrzeuge aus Rücksichtnahme auf die entgegenkommenden Fahrzeuge zu vermeiden, wurden Parkstände mittels Markierung einseitig halb auf den Gehweg gelegt. Auf diese Weise konnte eine Fahrbahnbreite von sechs Metern ermöglicht werden (vgl. Abbildung). Damit wurde ein reibungsloser Verkehrsablauf

Verkehrszeichen VZ101 „Gefahrenstelle“ mit Zusatzzeichen für TaBuLa (eigene Darstellung nach Katalog der Verkehrszeichen (VzKat))



Karte der drei befahrenen Strecken mit notwendigen Infrastrukturmaßnahmen farblich geclustert in Kategorien (eigene Darstellung auf Kartenbasis von boy | Strategie und Kommunikation GmbH)



Schwerpunkt

unter Inanspruchnahme eines Gehweges gewährleistet.

Kommunikation

Für die eingesetzten Fahrzeuge, die alle Fahrentscheidungen in den Rechneinheiten im Fahrzeug treffen und die Überwachung der Fahrfunktionen durch den Begleitenden im Fahrzeug erfolgt, ist ein flächendeckendes 3G- oder 4G-Netz ausreichend. Der Datenverbrauch liegt hier bei 5 bis 15 GB pro Monat und Fahrzeug über die M2M-SIM-Karte (Multi-Netzkarte für stabilen Empfang).

Sobald die Übernahme der Fahrfunktionen und/oder die Überwachung mittels Videokameras von einer nicht im Fahrzeug befindlichen Person erfolgt, sind erheblich größere Bandbreiten und Datenvolumina im Mobilfunknetz erforderlich. Am Fahrzeugstützpunkt wurden hohe Bandbreiten über einen stationären Internetanschluss notwendig, um für Updates, Sicherungen und Wartungen einen schnellen Datenaustausch zu ermöglichen (Down- und Uploadgeschwindigkeit mind. 50 Mbit/s).

Die Fahrzeuge können nicht die Farben oder Lichter der Signalgeber der Lichtsignalanlagen (LSA) erkennen. Die notwendige Kommunikation wurde daher mittels Road-Side-Unit (RSU) an den LSA und On-Board-Units in den Fahrzeugen als Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation (V2I) aufgebaut, damit ein auto-

matisiertes Fahren ohne Eingriff des Fahrzeugbegleitenden möglich ist. Mittels WLAN können Fahrzeuge und Lichtsignalanlagen Informationen über den fahrstreifenabhängigen Signalisierungszustand (grün/gelb/rot), KI-basierte Prognosedaten des erwarteten Phasenwechsels und individuelle Anmeldungen von Fahrzeugen zur ÖPNV-Beschleunigung austauschen. Da die beiden Licht-

Road-Side-Unit an der LSA B5 / B209



signalanlagen mit sehr alten Steuergeräten ausgestattet waren, wurden diese im Rahmen des Projektes ausgetauscht.

Im Verlauf der historischen und verkehrsberuhigten Elbstraße befinden sich als Zufahrtsbeschränkung zwei steuerbare Polleranlagen. Mit geringem baulichem Eingriff wurde mittels Einbaus von GSM-Modulen in die Steuereinheiten der Poller die Kommunikation mit den Fahrzeugen ermöglicht. Die Fahrzeuge lösen bei Erreichen eines bestimmten Koordinatenbereiches (nahe der Polleranlagen) einen Anruf der Module von einer authentifizierten Rufnummer aus, wodurch ein vorab programmierter Befehl durch die stationären Anlagen ausgeführt wird (z. B. Poller herunterfahren).

Um die Kommunikation von Technik zu Menschen mit Seh- und Gehbehinderung sowie den im Projekt entwickelten automatisierten Transportrobotern zu ermöglichen, wurden an Lichtsignalanlagen, ausgewählten Haltestellen und Fahrzeugen Bluetooth-Module installiert. Hierdurch wird ermöglicht, dass gehandicapte Menschen und Roboter ihre Ein-

TUHH-Transportroboter „Laura“ vor dem Einstieg ins TaBuLaShuttle



Anpassung der Fahrstreifenbreiten auf je 3 m Breite zu Lasten des Gehweges



schränkung an die Infrastruktur übermitteln und entsprechende Aktionen auslösen können. Dies umfasst die Möglichkeit der automatischen Aktivierung einer Phasenanforderung oder -dehnung an einer LSA, die Aktivierung einer Blindenakustik und Lautsprecheransagen an LSA und Haltestellen und viel Potential zur Kommunikation mit den Fahrzeugen, wie Türöffnung, Rampennutzung, Freigaben zur Abfahrt oder Auslösen eines Nothalts des Fahrzeuges über die zugehörige App.

Über die Schnittstelle des Fahrzeuges werden laufend Echtzeitdaten mit Statusinformationen über das Internet übertragen. Darunter sind auch die Koordinaten der Fahrzeuge, die in den aktiven Betriebszeitfenstern öffentlich auf der Projekthomepage im Internet dargestellt wurde.

Ortung und Navigation

Die zuverlässige Verfügbarkeit präziser Positionsdaten des Fahrzeuges ist notwendig, damit z. B. sichergestellt ist, dass das Fahrzeug spurtreu den eigenen Fahrstreifen nutzt und nicht auf benachbarte (Gegen-)Fahrstreifen gerät. Um die Positionsdaten der verfügbaren Satelliten zu präzisieren, stehen online Echtzeitpositionierungsdaten von Drittanbietern zur Verfügung (über das sog. Netz-RTK-Messverfahren), die über Zugriff auf entsprechende Bodenreferenzstationen ver-

fügen. Im Projekt TaBuLa wurde darüber hinaus eine eigene unabhängige Referenzstation auf dem Dach eines Verwaltungsgebäudes im Bedienungsgebiet errichtet, die parallel per Funk und über das Internet die Daten an die Fahrzeuge übermittelt und eine hohe Genauigkeit der Fahrzeugposition gewährleistet.

Schmale Häuserschluchten, Überführungen oder Baumdächer schränken die Verfügbarkeit globaler Satellitensysteme aufgrund der reduzierten freien Himmelsfläche ein. Sobald die Genauigkeit nachlässt, ist das Fahrzeug auf andere Systeme mit entsprechender Exaktheit angewiesen. Da Odometrie-Daten aus den Radumdrehungen hier keine hinreichende Sicherheit bieten, wird auf das im automatisierten Fahren weit verbreitete LIDAR-System („light detection and ranging“) vom Fahrzeug zurückgegriffen, das auch für die Hinderniserkennung maßgeblich ist. Im Fahrzeug sind genaue Karten des Umfeldes als Punktwolken gespeichert. Über die LIDAR-Sensorik kann nun ein Abgleich der gespeicherten Karten mit dem Umfeld erfolgen, was analog zur Satellitenortung eine hohe Genauigkeit ermöglicht. Sobald die freie Himmelsfläche eingeschränkt ist und keine festen dauerhaften Objekte im Umfeld bestehen, die das hier eingesetzte Fahrzeug zur Ortung nutzen kann, werden feste Landmarker notwendig. Dies betrifft im Projekt TaBuLa einen Stra-

ßenabschnitt im Wald, der ständigen natürlichen Veränderungen unterworfen ist. Als pragmatische Lösung wurden in dem Abschnitt Tafeln und Betonblocksteine am Straßenrand gesetzt, die dauerhaft gleichbleibende Referenzpunkte bilden und eine sichere und präzise Ortung ermöglichen.

Haltestellen

Insgesamt wurden im Projektverlauf 13 verschiedene Haltestellen angefahren. Vier davon konnten als bestehende Ein- und Ausstiegsbereiche gemeinsam mit dem konventionellen ÖPNV genutzt werden. Die automatisierten Fahrzeuge besitzen eine Regeleinstiegshöhe von 33 cm. Durch Absenken des Fahrzeuges mittels Kneeling kann der Fahrzeugboden auf eine Höhe von 28 cm reduziert werden. Selbst unter Einsatz der vorhandenen automatischen Rampe kann damit (ohne erhöhten Ein- und Ausstiegsbereich) keine Barrierefreiheit für Fahrgäste hergestellt werden. Aus diesem Grund wurden zwei reguläre Haltestellen dauerhaft und zwei projektbezogene Haltestellen temporär möglichst barrierefrei umgebaut und ein Haltestellenpodest mit 14 bis 18 cm Höhe realisiert, so dass über die Rampe eine Neigung kleiner als zehn Prozent möglich ist und Rollstuhlfahrenden und Transportrobotern ein problemloser Einstieg ermöglicht wird (vgl. Abbildungen auf Seite 18).

Zusammenfassung und Ausblick

Mit den eingesetzten Fahrzeugen unter Einsatz der beschriebenen Infrastrukturmaßnahmen ist es gelungen eine zusätzliche Buslinie in Lauenburg/Elbe automatisiert und unfallfrei zu betreiben.

Ein Regelbetrieb automatisierter Busse im ÖPNV ist ohne erhebliche Förderung noch nicht vorstellbar, da die Kosten pro Fahrplankilometer in TaBuLa aktuell viermal so hoch sind wie bei einer traditionellen Buslinie und ein Verzicht auf eine

Landmarker für die Ortung des Fahrzeuges im bewaldeten Streckenabschnitt



Schwerpunkt

fahrzeuggesteuerte Person noch nicht möglich ist. Aktuelle Herausforderungen in der weiteren Automatisierung der Fahrzeugtechnik sind

- Überwachung und Steuerung von Fahrzeugen aus einer Leitstelle,
- Verbesserung der Objektklassifizierung und Sensordatenfusion,
- aktuelle Kartierungsdaten sowie standardisierte Baustellen- und Gefahrenkommunikation,
- Navigationslösungen für Abschnitte mit unzureichenden Ortungseigenschaften,
- Links ein- und abbiegen sowie Ausweich- und Überholmanöver und
- eine bedarfsgerechte Betreuung der Fahrgäste.

Dabei muss es gelingen die infrastrukturseitigen Maßnahmen auf ein Minimum zu reduzieren und auf Maßnahmen, wie sie unter Beschilderung und Markierung beschrieben werden, zu verzichten.

Unverzichtbar erscheinen für einen autonomen Busbetrieb infrastrukturseitig die Bereitstellung leistungsfähiger Mobilfunknetze, die standardisierte kommunikative Aufrüstung von Lichtsignalanlagen und ähnlichen Anlagen (V2I) sowie eine geeignete Infrastruktur an Zu- und Abgangspunkten des ÖPNV.

Im automatisierten Realbetrieb wird deutlich, dass die Bewältigung komplizierter oder uneindeutiger Verkehrssituationen sowie schlechte Sichtverhältnisse für automatisierte Fahrzeuge eine Herausforderung darstellen. An diesem Punkt kann beim Entwurf einer Straße schon heute angesetzt werden, indem gut einsehbare, standardisierte, richtlinienkonforme und damit sichere Verkehrsanlagen für alle Verkehrsteilnehmenden realisiert werden.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht unter anderem hinsichtlich der Markierung und Beschilderung, insbesondere für Baustellen und deren dynamische Integration in digitale Karten und Kommunikationssysteme. Außerdem zeigt sich im Projekt TaBuLa, dass automatisierte Fahrzeuge extrem spurtreu fahren können, das heißt jede Runde exakt in der gleichen Achse. Aufgrund des geringen Gesamtgewichtes der TaBuLa-Shuttles sind in Lauenburg/Elbe abgesehen von Reifenabrieb keine Auswirkungen zu erkennen. Bei höheren Achslasten sind größere Auswirkungen der Spurtreue auf den Fahrbahnaufbau zu erwarten.

Aus dem Projekt TaBuLa gehen diverse Veröffentlichungen unter anderem zu anderen Themen wie der Akzeptanz, den Kosten und dem Betrieb autonom fahrender Busse sowie rechtliche Rahmenbedingungen und Warentransport im ÖPNV hervor. Weitere Informationen und Kontaktdaten finden sich auf der Projekthomepage www.tabulashuttle.de.

Temporäre TaBuLa-Haltestelle aus Kunststoffelementen am Postverteilzentrum



Temporäre TaBuLa-Haltestelle aus Holzelementen am Museum



*Matthias Grote
Technische Universität Hamburg*