

RASMUS RETTIG | CHRISTOPH SCHÖNE | TOBIAS WENZEL | TYLL DIEBOLD | JACQUELINE MAAB

# Automatisierte, experimentelle Untersuchung der Voraussetzungen für den robusten Betrieb eines autonomen Kleinbusses im ÖPNV am Beispiel des Projektes TaBuLa in Lauenburg (Elbe)

Einleitung – Projekt TaBuLa, Teststrecke und Fahrzeug – Datenaufnahme – Ergebnisse – Zusammenfassung

## 1. Einleitung

Der Einsatz elektrifizierter und autonomer Fahrzeuge im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) verspricht eine Reihe von Vorteilen, wie z. B. die Verbesserung der Energieeffizienz, die Erhöhung der Sicherheit sowie die Reduzierung der Kosten. Autonome Kleinbusse bieten zudem das Potenzial, ländliche Gebiete, in denen ein komfortabler, dicht getakteter ÖPNV nicht darstellbar ist, individualisiert und dynamisch nach Bedarf zu versorgen. Sie bilden damit einen Schlüssel zur Angleichung des Mobilitätsangebots zwischen hochverdichteten Städten mit dichter Mobilitätsversorgung und ländlichen Regionen ohne ein geeignetes Nahverkehrsangebot. Autonome Kleinbusse im ÖPNV wurden bereits in über 50 Projekten weltweit auf unterschiedlichen Strecken erprobt [1, 2]. Eine Voraussetzung für einen späteren Linienbetrieb autonomer Fahrzeuge im ÖPNV ist ihr zuverlässiger und dauerhaft störungsfreier Betrieb. Ein Fahrzeug soll zu jeder Jahres- und Tageszeit unter allen auftretenden Umgebungsbedingungen die vorgesehene Route pünktlich abfahren können. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden über einen Zeitraum von fünf Monaten systematisch Stopps des Fahrzeugs – automatisiert, in Abhängigkeit von Ort und Zeitpunkt – gesammelt, analysiert und die Ursachen ermittelt. Ungeplante Hindernisse in der vorgegebenen Fahrspur, der sogenannten „virtuellen Schiene“, waren eine Hauptursache für ungeplante Stopps beim Betrieb des Fahrzeugs.

Darüber hinaus waren die Stabilität der Mobilfunkverbindung – insbesondere beim Wechsel zwischen Übertragungsarten – sowie der sichere und ungestörte Empfang einer ausreichenden Zahl von GNSS-Satelliten von großer Bedeutung.



TESTZENTRUM  
AUTONOME BUSSE  
LAUENBURG / ELBE

## 2. Projekt TaBuLa – Teststrecke und Fahrzeug

Im Rahmen des Projektes TaBuLa\* wurden insgesamt drei Teststrecken befahren. Die ersten beiden Strecken dienten der Erprobung des Fahrzeugs, der schrittweisen Einweisung der Fahrzeugbegleiter für den Betrieb des Fahrzeugs und der Infrastruktur sowie der Optimierung des Zusammenspiels der Infrastruktur mit dem Fahrzeug. Seit Mai 2020 wird – wie im Projekt vorgesehen – die längste und anspruchsvollste Strecke 3 im Regelbetrieb befahren. Die hier vorgestellten Untersuchungen fokussieren daher ausschließlich auf Daten aus dem Regelbetrieb auf der Strecke 3 (siehe auch Bild 1) [3]. Der Linienbetrieb führt ausgehend vom Zentralen Omnibus Bahnhof (ZOB, 01) über die Haltestellen 02 bis 07.

Die Besonderheit der Strecke in Lauenburg/Elbe ist die Kombination von Anforderungen und technischen Gegebenheiten, die für sich betrachtet bereits in anderen Projekten adressiert werden, in ihrer Verbindung bislang jedoch nicht untersucht wurden. Eine Übersicht im Vergleich mit anderen Projekten ist in Tabelle 1 dargestellt.

\* Die dieser Veröffentlichung zugrundeliegenden Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur im Rahmen der Förderrichtlinie „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ mit 1,9 Millionen Euro gefördert (Förderkennzeichen 16AVF2152). Die Verantwortung für den Inhalt liegt ausschließlich bei den Autoren.

Prof. Dr.  
Rasmus Rettig,  
Christoph Schöne  
und  
Tobias Wenzel,  
Hochschule für Angewandte Wissenschaften,  
Hamburg,  
Tyll Diebold  
und  
Jacqueline Maaß,  
Technische Universität Hamburg,  
Institut für Verkehrsplanung und Logistik



Bild 1: Übersicht der Teststrecken des autonomen Kleinbusses; Basis dieser Untersuchung ist der Linienbetrieb über die Haltestellen 01 bis 07 [3]

- a) Befahrung eines ca. 350 m langen Abschnitts auf einer Bundesstraße (B 5/B 209 – Berliner Straße) mit einer Verkehrsstärke von 12.000 Fahrzeugen pro 24 Stunden an Werktagen (DTVw) und zwei Lichtsignalanlagen [4] Aus Lärmschutzgründen ist der Abschnitt der Bundesstraße, der vom autonomen Kleinbus befahren wird, mit einer Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h gekennzeichnet. Obwohl die maximal zugelassene Geschwindigkeit des Fahrzeugs 18 km/h beträgt, kann eine zusätzliche Behinderung des nachfolgenden Verkehrsflusses weitestgehend minimiert werden, da das Einfahren des automatisierten Kleinbusses in diesen Abschnitt über einen Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage (LSA) erfolgt. Eine Veränderung der LSA-Phasen für den Betrieb des autonomen Kleinbusses ist nicht erfolgt. Nach Passieren der zweiten LSA biegt das Fahrzeug von der Bundesstraße rechts auf die Straße „Großer Sandberg“ ab.
- b) Insgesamt zwei LSA, die vom autonomen Kleinbus eigenständig passiert werden  
Beide LSA wurden für das Projekt mit jeweils einer Road Side Unit (RSU) ausgestattet, die die jeweiligen Phasenzustand der LSA an den autonomen Kleinbus über-

mitteln. Hierdurch konnte ein automatisiertes Passieren der LSA durch den autonomen Kleinbus realisiert werden.

- c) Ein starkes Gefälle und eine hohe Steigung von jeweils bis zu 16 % über eine Strecke von jeweils 600 m Die Straße „Großer Sandberg“ wird von Norden, von der Bundesstraße kommend, Richtung Süden als Gefälle-strecke von ca. 600 m Länge bis in die Altstadt befahren. Von der Richtung Westen durchquerten Altstadt wird die Straße Hohler Weg aus Steigungsstrecke auf ca. 600 m Länge Richtung Norden befahren.
- d) Kopfsteinpflaster als Straßenbelag, insbesondere auf den Abschnitten mit starkem Gefälle oder hoher Steigung  
Die Steigungsstrecke, die das Fahrzeug bewältigen muss, weist als Fahrbahnuntergrund altes Kopfsteinpflaster auf, das bei feuchten Witterungsverhältnissen für die Traktion des Fahrzeugs eine Herausforderung darstellt. Gleiches gilt für das Gefälle, das zum Teil aus Kopfsteinpflaster besteht.
- e) Im Bereich der Altstadt sehr geringe, nicht normgerechte Breite des Straßenraumes  
Die geringe Breite der historisch gewachsenen Altstadtstraßen im Süden von Strecke 3 mit minimal 3,35 m sowie der Zweirichtungsverkehr in der Elbstraße, erlaubt die Untersuchung der Robustheit des autonomen Betriebs unter Berücksichtigung folgender Störgrößen:
  - Veränderliche Vegetation, die in die Sicherheitszone um das Fahrzeug oder in den Fahrweg des Fahrzeugs hineinragt
  - Gegenverkehr mit stark eingeschränkten Ausweichmöglichkeiten
  - Fahrzeuge, die an nicht zulässigen Stellen im oder nahe am Fahrweg abgestellt wurden
- f) Ein durch zwei Polleranlagen durchfahrtsbeschränkter Bereich in der Elbstraße  
Im Süden auf der Elbstraße ist ein Abschnitt von ca. 250 m durch versenkbare Poller für den Durchgangsverkehr gesperrt. Für das Fahrzeug wurde daher eine maßgeschneiderte Lösung entwickelt, um die Kommunikation der Polleranlage mit dem autonomen Kleinbus

Parameter	Projektname/Stadt						
	Autonomer Bus/ Monheim	HEAT/Hamburg	Shuttlebus/ Bad Birnbach	SmartShuttle/ Sion (CH)	AutoNom/ Sylt	Linie 12/ Neuhausen (CH)	TaBuLa/ Lauenburg (Elbe)
Öffentlicher Straßenraum	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Gradienten über 10 %	nein	nein	nein	nein	nein	bis zu 15 %	bis zu 16 %
Untergrund und Straßenbreite	Kopfsteinpflaster, enge Altstadtgassen	Kopfsteinpflaster, Asphalt, normale Fahrbahnbreite	Asphalt, Kopfsteinpflaster	Asphalt, Kopfsteinpflaster, enge Altstadtgassen	Asphalt	Asphalt	Kopfsteinpflaster, Asphalt, enge Altstadtgassen
LSA Ertüchtigung	nein	ja	nein	ja	nein	nein	ja
Poller-Steuerung	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Hersteller des Fahrzeugs	EasyMile	IAV	EasyMile	Navya	Navya	Navya	Navya
Quellen	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]

Tabelle 1: Eigene Darstellung von ausgewählten Projekten zu automatisierten Kleinbussen im ÖPNV, die mit zu TaBuLa vergleichbaren Testfeldparametern operieren

zu erreichen und ein Einfahren in das beschränkte Areal ohne manuellen Eingriff eines Operators zu ermöglichen. Hierfür wurde ein geographisch beschränkter Bereich (Geofence) vor dem östlichen Ende der Polleranlage eingerichtet. Bei Einfahrt des Fahrzeugs in den digital eingegrenzten Bereich wählt es über eine Mobilfunkverbindung selbständig die Polleranlage an, so dass bei Erreichen des Pollers dieser in der Regel bereits abgesenkt ist. Beim Verlassen des Bereiches auf der Elbstraße in westlicher Richtung wird der zweite Poller mittels einer vorgelagerten Kontaktschleife in der Fahrbahn aktiviert und abgesenkt.

Der autonome Kleinbus in Bad Birnbach war eines der ersten Projekte im öffentlichen Straßenraum [12, 14]. Zwischenzeitlich gibt es eine größere Anzahl von Projekten, die das Potenzial von autonomen Kleinbussen für den ÖPNV auch in komplexen, technisch anspruchsvollen Umgebungen evaluieren, wobei – nach der prototypischen Realisierung – die robuste Nutzung im Regelbetrieb eines Verkehrsunternehmens immer wichtiger wird [13, 14]. Die beschriebenen Gegebenheiten der Strecke spielten für die Auswahl des autonomen Kleinbusses im Projekt TaBuLa eine entscheidende Rolle und schränkten die Auswahl möglicher Lieferanten ein. So bot nur ein Hersteller die Option eines Allradantriebs an, der zur Bewältigung der Steigungen auf Kopfsteinpflaster erforderlich war. Eine Übersicht über die technischen Parameter des eingesetzten Fahrzeugs gibt Tabelle 2.

### 3. Datenaufnahme

Das Fahrzeug wurde mit einem Datenaufnahmegerät ausgestattet, welches – unabhängig und gekapselt von den Fahrzeugsystemen – Informationen über Fahrzeugposition, -orientierung und -geschwindigkeit sowie weitere Daten aufnimmt und automatisiert bereitstellt. Die Integration des Datenaufnahmegerätes, der GNSS-Antenne sowie eines zusätzlichen, externen Inertialsensorclusters ist in den Bildern 2 und 3 dargestellt.

Das Datenaufnahmegerät bestimmt mit Hilfe des integrierten GNSS-Empfängers die Position, Orientierung und Geschwindigkeit des Fahrzeugs mit einer Abtastrate von 1 Hz.

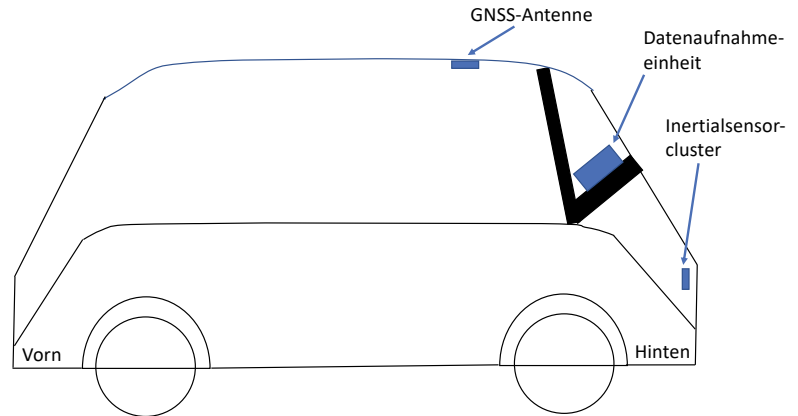


Bild 2: Schematische Darstellung der Integration von Datenaufnahmeeinheit, GNSS-Antenne sowie dem Inertialsensorcluster

Zudem werden die Beschleunigung, die Drehrate sowie die Richtung und der Betrag des externen Magnetfelds am Ort des Sensors mit 50 Hz bestimmt. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die gemessenen Größen und der Messparameter.

Insgesamt wurden fast 900 Stunden Betrieb auf den drei vom Projekt befahrenen Strecken aufgezeichnet. Hiervon wurden für die folgende Analyse ausschließlich

Parameter	Eigenschaft
Antrieb	Allrad
Umfeld-Sensor Mapping/Navigation/Überwachung	2 x 3D-LIDAR, 16 Layer; 6 x 2D-LIDAR
Kommunikation	3G/4G Antenne
Positionsbestimmung	GNSS
Max. Geschwindigkeit	25 km/h
Zugelassene Geschwindigkeit	18 km/h
Maximale Steigung	18 %
Nominalkapazität der Batterie	33 kWh
Motorleistung Spitze	34 kW
Motorleistung konstant	22,6 kW
Motorspannung	48 V

Tabelle 2: Technische Daten des eingesetzten autonomen Kleinbusses [15]

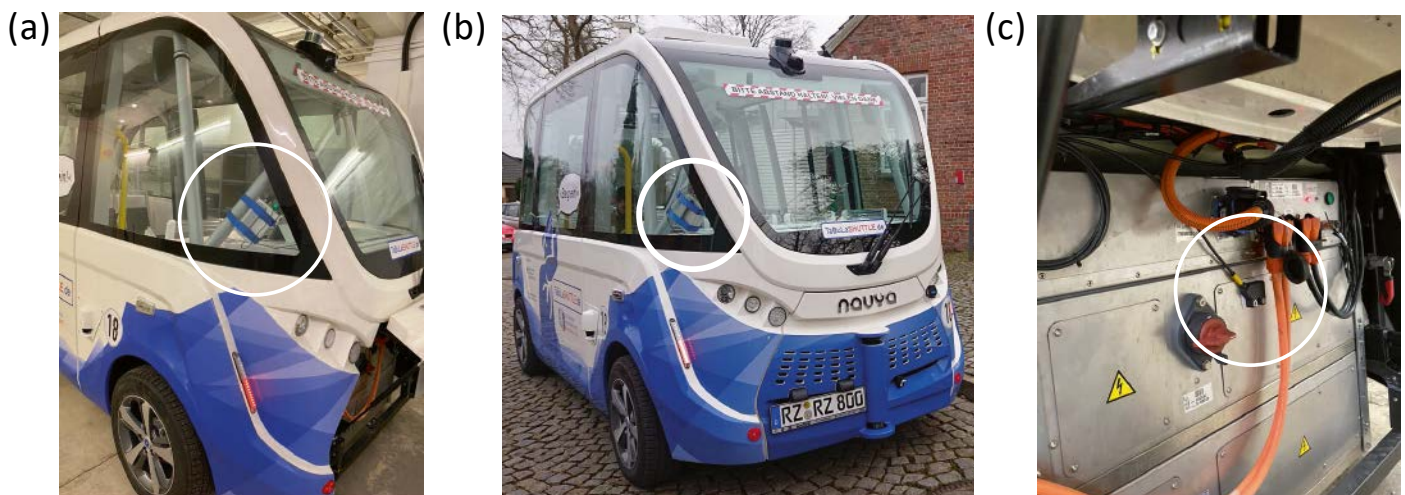


Bild 3: (a), (b) TaBuLa Kleinbus mit integriertem Datenaufnahmegerät, (c) zusätzlich im Heckbereich angebrachtes Inertialsensorcluster

Datenquelle	Messgröße	Einheit	Messfrequenz [Hz]	Messbereich	Auflösung
Geoposition (GPS/GALILEO/GLONASS/BEDOU)	Zeitstempel	[HH:MM:SS]	1	-	1 Sek.
	Position (Longitude, Latitude)	1		-	0,000001
	Anzahl Satelliten	1		-	1
	Geschwindigkeit (ermittelt aus Positionsveränderung)	[km/h]		-	0,01
Inertialsensorcluster Heckbereich und Inertialsensorcluster in der Datenaufnahmeeinheit	Beschleunigung X	[g]	50	+/- 8	0,000244
	Beschleunigung Y				
	Beschleunigung Z				
	Drehrate X	[°/s]		+/- 250	0,0076
	Drehrate Y				
	Drehrate Z				
	Magnetfeld X	[μT]		+/- 4800	0,6
Magnetfeld Y					
Magnetfeld Z					
Temperatur	[°C]	-40 ... +85	0,003		
GSM	Netzwerktyp	2G/3G/4G	1	-	-
	Empfangsqualität	-	-	0 ... 5	1

Tabelle 3: Übersicht der automatisch aufgezeichneten Messgrößen

die Umläufe auf der Strecke 3 ausgewählt, die im vorgesehenen Linienbetrieb abgefahren wurden. Der im Folgenden analysierte Datensatz besteht daher aus etwa 225 Stunden Messdauer mit 424 vollständigen Umläufen an insgesamt 72 Betriebstagen innerhalb eines Zeitraums von 5 Monaten.

#### 4. Ergebnisse

##### 4.1 Analyse der Stillstände

Für einen robusten und fahrplanmäßigen Linienbetrieb ist es wichtig zu prüfen, ob das Fahrzeug häufiger an nicht vorhersehbaren Orten zum Stillstand kommt. Während Stillstände an Haltestellen, LSA, Fußgängerüberquerungen oder vorgesehenen Kontrollpunkten (Operator-Stops) beabsichtigt und zumindest zu erwarten sind, weisen gehäufte Stillstände an nicht erwarteten Orten auf zusätzliche Probleme hin, die für einen geordneten Linienbetrieb aufzulösen sind. Bild 4 gibt einen Überblick über Häufungen von Stillständen, die durch Analyse der GNSS-Signale ermittelt wurden. Neben den vorgesehenen Stops sind Häufungen in Bereichen zu finden, in denen Fahrzeuge im Bereich des Fahrwegs abgestellt wurden („Probleme mit Falschparkern“ in Bild 4). Diese stellen für autonome Fahrzeuge ohne Fahrereingriff bislang ein kaum lösbares Problem dar, weil Objekte in den Sicherheitsbereich des Fahrzeugs hineinragen und damit einen Stillstand erzwingen.

Neben Stillständen sind ungeplante Bremsvorgänge ein Indikator für unvorhergesehene Problemsituationen für das autonome Fahrzeug. Neben ihrem Einfluss auf die Einhaltung des Fahrplans verschlechtern diese auch den Fahrkomfort. Bild 5 zeigt die auftretenden Beschleunigungen in Fahrtrichtung beim Bremsen des Fahrzeugs. Auffällig beim Vergleich der Bilder 4 und 5 ist, dass im Bereich der Altstadt zwar nur selten gestoppt wird, es aber dennoch häufig zu Bremsvorgängen mit Beschleunigungen im Bereich von über -3,5 m/s<sup>2</sup> kommt. Als Ursache in diesem Bereich der Fahrtstrecke wurden Pflanzen ausgemacht, die sich im Bereich des Fahrwegs ausgebreitet haben. Darüber hinaus wurde häufig vor der Einfahrt in den durchfahrtsbeschränkten Bereich sowie in Bereichen gebremst, in denen abgestellte Fahrzeuge in den Fahrweg hineinragten (Bild 6).

##### 4.2 Analyse von Umlaufzeiten

Die Umlaufzeiten auf Strecke 3 wurden automatisiert analysiert und die Ergebnisse in Bild 7 dargestellt. Im Mittel dauerte ein Umlauf knapp 32 Minuten, wobei eine erhebliche Streuung zu beobachten ist. Die Minimalzeit für einen Umlauf lag bei 15 Minuten, die maximale Umlaufzeit bei 120 Minuten. Rund 90% aller Umläufe liegen zwischen 15 und 50 Minuten. Die Variation ist deutlich höher, als im Linienbetrieb zu erwarten wäre. Ein planmäßiger Umlauf auf einer vergleichbaren Strecke mit einem konventionellen Linienbus (Linie 338) dauert – gemäß Fahrplan – 15 Minuten.

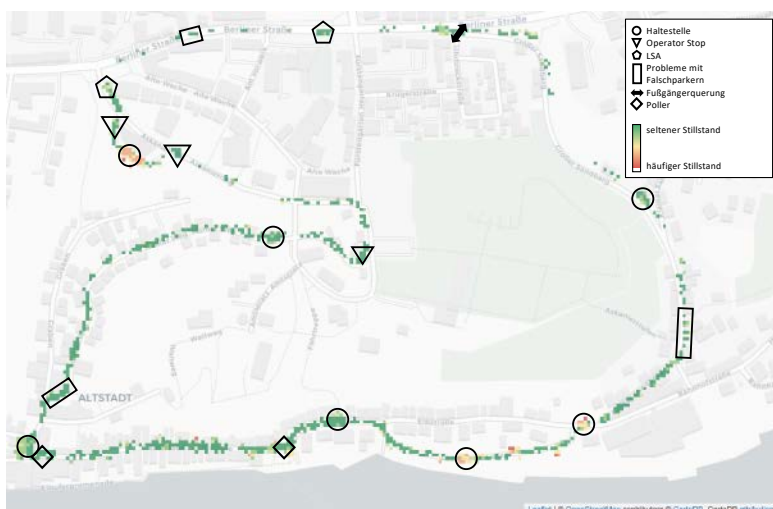


Bild 4: Verteilung der Häufigkeit von Stillständen auf der Strecke

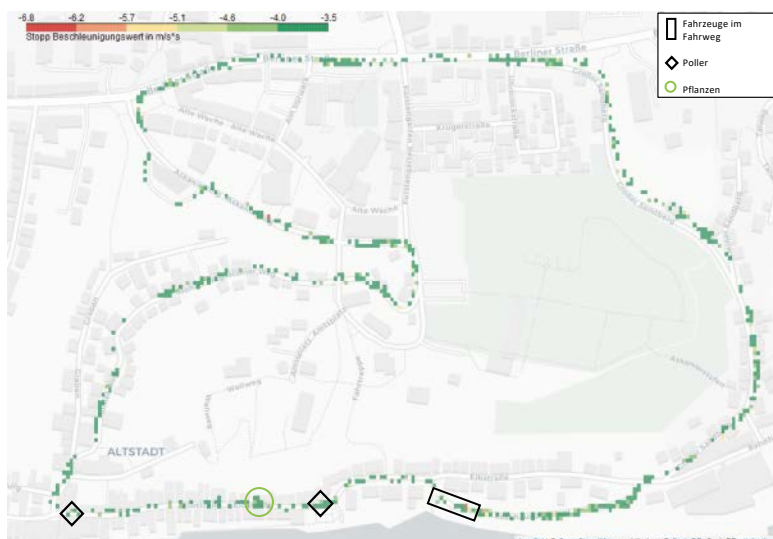


Bild 5: Räumliche Verteilung der Maxima der gemessenen Bremsbeschleunigungen in Fahrtrichtung

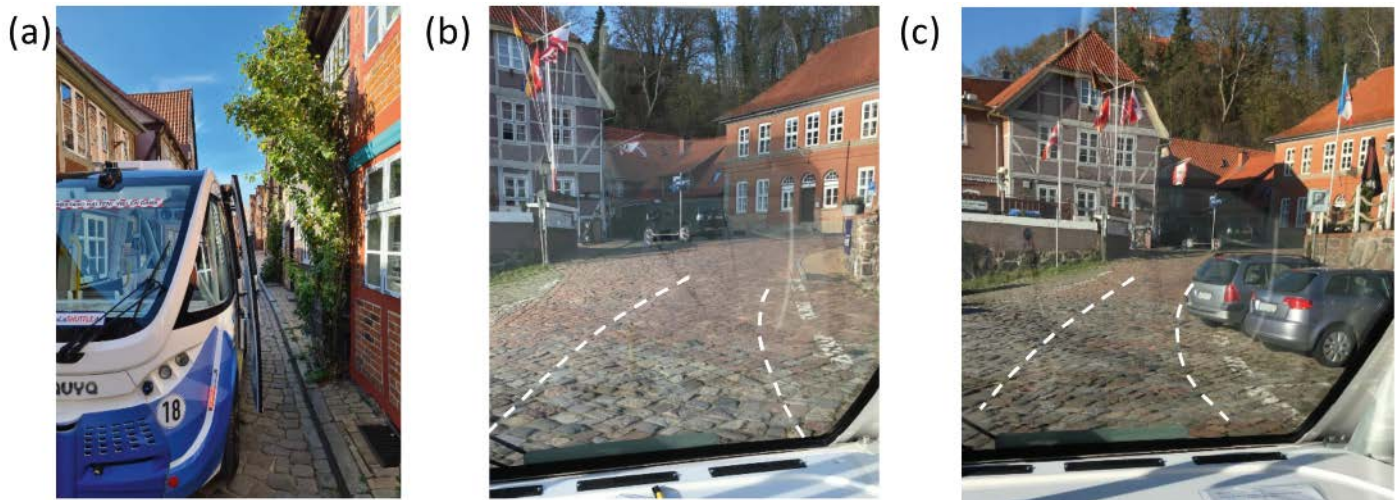


Bild 6: (a) In den Sicherheitsbereich hineinragende Pflanzen in der Elbstraße [16], (b) freie Fahrt [17] und (c) abgestellte Fahrzeuge mit Heck im Sicherheitsbereich im Bereich Lösch- und Ladeplatz [18]

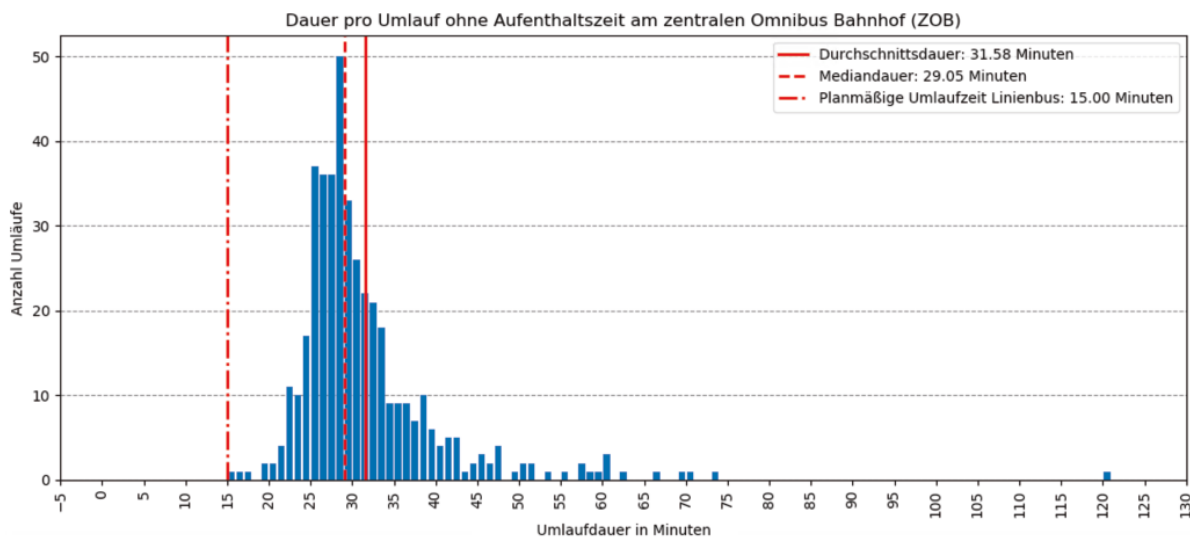


Bild 7: Analyse der Umlaufzeiten für Strecke 3 im Zeitraum 19.5.2020 bis zum 22.10.2020 mit insgesamt 439 Runden ohne Aufenthaltszeit am Zentralen Omnibus Bahnhof (ZOB)

### 4.3 Analyse der GNSS-Signale

Zur Bewertung der Strecke für die Nutzung mit autonomen Kleinbussen ist die Anzahl verfügbarer GNSS-Satelliten ein wichtiger Indikator für potenzielle Probleme bei der Selbstlokalisierung des Fahrzeugs. Hierzu ist in Bild 8 zunächst die durchschnittliche Zahl der empfangenen Satelliten dargestellt. Diese liegt in weiten Teilen der Strecke bei 30, was eine gute Selbstlokalisierung des autonomen Kleinbusses erwarten lässt. Um die potenziell kritischen Bereiche zu finden, in denen die Anzahl empfangener Satelliten nicht ausreicht, ist die Minimalzahl für jede Position über den Messzeitraum in Bild 9 dargestellt. Hier zeigt sich, dass im Bereich der Altstadt die Anzahl empfangener Satelliten bis in den Bereich von 14 bis 20 abfällt. Auch das ist für eine Selbstlokalisierung ausreichend. Zu beachten ist, dass für diese Messung eine GNSS-Antenne unterhalb des Kunststoff-Dachs des Fahrzeugs angebracht wurde. Die empfangene Signalstärke ist daher potenziell niedriger, als bei einer Montage auf dem Dach. Zur Relativbewertung unterschiedlicher Streckenabschnitte erscheint das Verfahren dennoch geeig-

net. Neben den empfangenen GNSS-Satelliten nutzt der autonome Kleinbus ein Korrektursignal zur Erhöhung der Genauigkeit (GNSS-RTK, Real-Time-Kinematics, z. B. [19]).

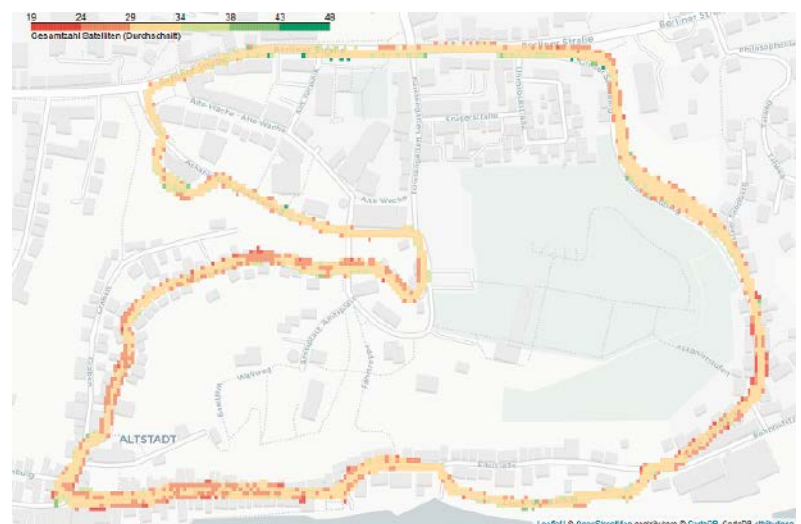


Bild 8: Durchschnittliche Zahl verfügbarer GNSS-Satelliten

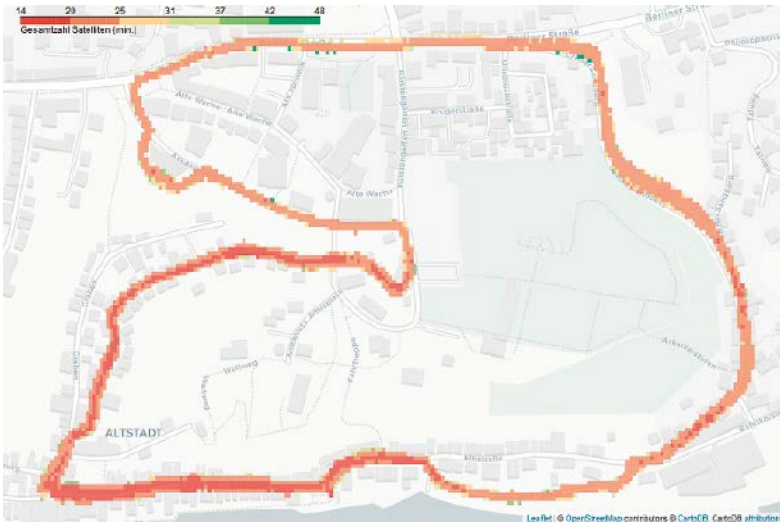


Bild 9: Minimale Anzahl verfügbarer GNSS-Satelliten

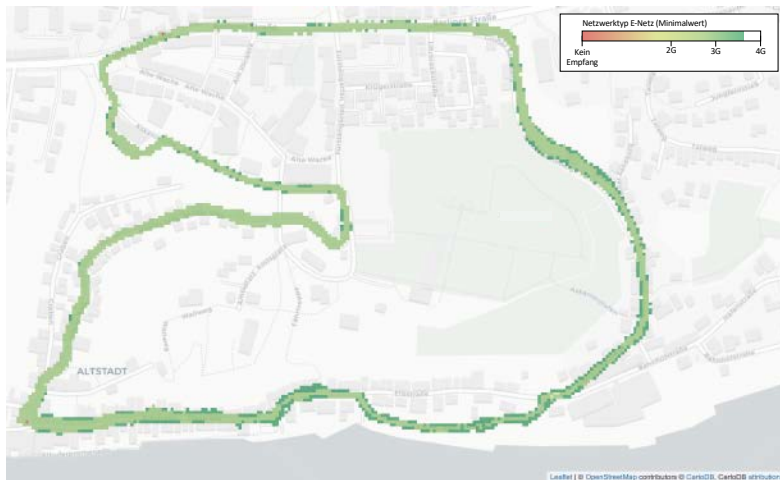


Bild 10: Minimal verfügbarer Netzwerktyp im O2/Telefonica Netzwerk

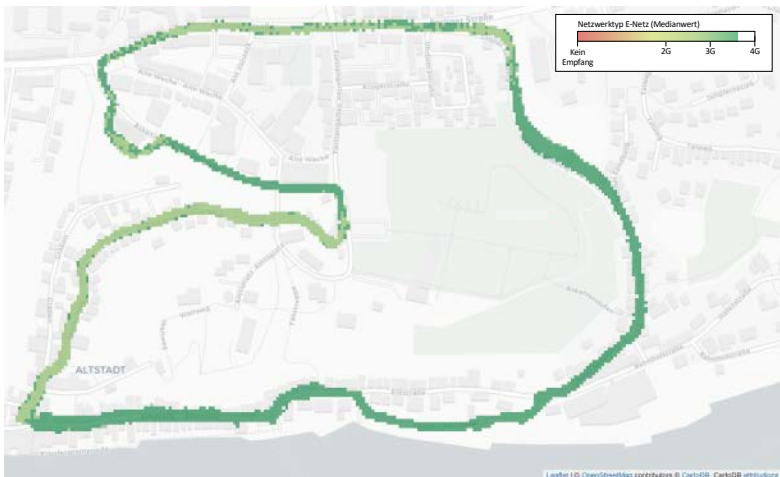


Bild 11: Median des verfügbaren Netzwerktyps im O2/Telefonica Netzwerk

Dieses Signal wird durch eine in der Nähe aufgebaute Basisstation erzeugt und über das Mobilfunknetz übertragen. Ein Ausfall des Signals über einen Zeitraum von mehr als 30 Sekunden führt zu einem Stillstand des Fahrzeugs. Daher wird im folgenden Abschnitt die Abdeckung durch das eingesetzte Mobilfunknetz untersucht.

#### 4.4 Analyse der Mobilfunkabdeckung

Die nahezu permanente Verfügbarkeit von Mobilfunk ist für autonome Kleinbusse erforderlich, da auf diesem Wege Korrekturinformationen für die Satellitennavigation übermittelt werden, die die Genauigkeit unter guten Umgebungsbedingungen bis in den Zentimeterbereich verbessern. Zudem kann der Fahrzeughersteller auf diesem Wege Fernanalysen durchführen oder zukünftig auch die Steuerung des Busses übernehmen. In Bild 10 ist hierzu zunächst der niedrigste Netzwerktyp für jeden Punkt auf der Strecke 3 dargestellt, mit dem sich die eingesetzte Datenaufnahmeeinheit verbinden konnte. Untersucht wurde das Netz des Providers O2/Telefonica, der auch im autonomen Kleinbus eingesetzt wurde. Die Darstellung zeigt, dass sich der autonome Kleinbus überall und zu jeder Zeit wenigstens über das 3G Netzwerk verbinden konnte.

Zum Vergleich ist in Bild 11 der Median des Netzwerktyps dargestellt. Das Bild verdeutlicht, dass in großen Teilen der Strecke meist eine 4G-Verbindung bestand. Relevant sind in Bild 11 zudem die Übergänge 3G-4G, die einen Hinweis liefern, dass an diesen Stellen häufig der Netzwerktyp wechselt. Solche Änderungen im Verbindungstyp können kurzzeitige Unterbrechungen in der Verbindung des Fahrzeugs erzeugen und je nach Dauer zum Stillstand des autonomen Kleinbusses führen. Neben dem Netzwerktyp ist die Signalstärke von Bedeutung. Der Minimalwert an jedem untersuchten Punkt ist in Bild 12 und der Median in Bild 13 dargestellt. Die Darstellungen zeigen, dass die Signalstärke auf der Strecke punktuell sehr schwach ist, über die Zeit variiert und eine permanente Verbindung daher potenziell nicht immer aufrechterhalten werden kann. Aufgrund des beobachteten Wechsels der Netzwerktypen zwischen 3G und 4G im Bereich der Bundesstraße, die in Bild 12 mit einem Oval markiert ist, lässt sich die in den Fahrtberichten festgehaltene Häufung von Stopps in diesem Bereich durch fehlende Korrektursignale und in deren Folge kurze Zeit später eintretendes Halten des autonomen Kleinbusses erklären. Zudem kam es im Bereich des ZOB, wie in Bild 12 mit einem Kreis markiert, aufgrund von Wechseln des Netzwerktyps zu verlängerten Stillständen.

#### 5. Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war die Identifikation von Streckenparametern und Bedingungen, die für den robusten Betrieb eines autonomen Fahrzeugs erforderlich sind, sowie die Erkennung von potenziellen Problemstellen und ihren Ursachen. Basis für die Analyse ist eine umfangreiche und automatisierte Messdatenerfassung über einen Zeitraum von 5 Monaten (19.5.2020 bis 22.10.2020), in welcher das Fahrzeug im autonomen Linienbetrieb auf einer festen Strecke eingesetzt wurde. Die Messdaten mit einem Gesamtumfang von  $10^9$  Datenpunkten wurden automatisiert auf Stillstandszeiten, Bremsvorgänge, den Empfang von GNSS-Satelliten sowie den Mobilfunkempfang ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein stabiler Linienbetrieb voraussetzt, dass

- der Fahrweg zu jeder Zeit frei von ungeplanten Hindernissen ist. Dies Bedarf der Akzeptanz, Mitwirkung

und Disziplin von allen beteiligten Anwohnern und Verkehrsteilnehmern

- das Mobilfunknetz stabil, mit ausreichender Signalstärke und möglichst frei von Wechseln des Netzwerktyps ist
- ein stabiler Empfang von einer ausreichenden Zahl von GNSS-Satelliten in allen Bereichen gewährleistet ist.
- Für den Einsatz von autonomen Kleinbussen wird daher – sowohl vorbereitend als auch im laufenden Betrieb – empfohlen,
- die Streckenbeschaffenheit insbesondere auf potenzielle, temporäre Einschränkungen des Fahrstreifens zu untersuchen und diese zu minimieren,
- das Mobilfunknetz orts- und zeitabhängig auf den Netzwerktyp, die Umschaltung zwischen unterschiedlichen Verbindungsarten sowie die Signalstärke zu vermessen,
- den GNSS-Empfang orts- und zeitabhängig zu vermessen und zu analysieren,
- die Ergebnisse systematisch mit Stillstandszeiten und Bremsvorgängen zu korrelieren.

Dieses Vorgehen ermöglicht die systematische Analyse und Implementierung von Maßnahmen beim Übergang von einem prototypischen zu einem robusten Linienbetrieb von autonomen Kleinbussen. ■

Literatur

[1] Calin Iclodean, C./Cordos, N./Ovidiu Varga, B.: Autonomous Shuttle Bus for Public Transportation: A Review, Energies 2020, 13, 2917; doi:10.3390/en13112917.

[2] Ainsalu, J. et al.: State of the Art of Automated Buses, Sustainability 2018, 10(9), 3118; https://doi.org/10.3390/su10093118.

[3] VHH/Agentur Boy: Fahrwegkarte der Strecke 3, VHH, 2020.

[4] Stadt Lauenburg/Elbe: Geschwindigkeits- und Verkehrsmengenkarte, unveröffentlicht, 2018.

[5] Stadt Monheim am Rhein: Autonom Fahren Busse, https://www.monheim.de/stadtleben-aktuelles/stadtprofil/smart-city, abgerufen am 18.12.2020.

[6] Hamburger Hochbahn AG: Die Zukunft fährt autonom, Das HOCHBAHN-Forschungsprojekt HEAT, https://www.hochbahn.de/hochbahn/hamburg/de/Home/Naechster\_Halt/Ausbau\_und\_Projekte/projekt\_heat, abgerufen am 18.12.2020.

[7] Brandt, C./Böker, B./Bullinger, A./Conrads, M./Duisberg, A./Stahl-Rolf, S.: Fallstudie: Autonomer Bus Bad Birnbach, https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/A/autonomer-bus-bad-birnbach.html, abgerufen am 18.12.2020.

[8] PostAuto AG: Projekt SmartShuttle, https://www.postauto.ch/de/projekt-smartshuttle, abgerufen am 18.12.2020.

[9] Projekt NAF-Bus: , abgerufen am 18.12.2020.

[10] Swiss Transit Lab: Die Linie 12, www.swisstransitlab.com/de/linie-12, abgerufen am 18.12.2020.

[11] Projekt TaBuLa: TaBuLa, Aufbau eines Testzentrums für automatisiert verkehrende Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg, www.tabulashuttle.de, abgerufen am 18.12.2020.

[12] Kolb, J.C./Wech, L./Schwabe, M./Ruzok, C./Trost, C.: Technische Aspekte des automatisierten Fahrens am Projekt des autonomen Shuttlebusses in Bad Birnbach. In: Riener A./Appel A./Dorner W./Huber T./Kolb J./Wagner H. (eds): Autonome Shuttlebusse im ÖPNV. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2020; https://doi.org/10.1007/978-3-662-59406-3\_5.

[13] VDV Das Magazin: Titelstory: Autonomes Fahren als Zukunftsfrage, Heft 01/2017, https://www.vdv-dasmagazin.de/story\_01\_2017-02-23\_10-05-41.aspx, abgerufen am 3.12.2020.

[14] Riener, A./Appel, A./Dorner, W./Huber, T./Kolb, J.C./Wagner, H.: Autonome Shuttlebusse im ÖPNV. Berlin, Heidelberg 2020.

[15] Navya SE: Autonom Shuttle Evo, navya.tech, abgerufen 17.12.2020.

[16] Foto Elbstraße vom 18.9.2020, VHH.

[17] Foto Lösch- und Ladeplatz vom 20.11.2020, VHH.

[18] Foto Parkende Fahrzeuge, Lösch- und Ladeplatz vom 20.11.2020, VHH.

[19] Feng, Y./Wang, J.: GPS RTK Performance Characteristics and Analysis, June 2008, Journal of Global Positioning Systems 7(1), DOI: 10.5081/jgps.7.1.1.

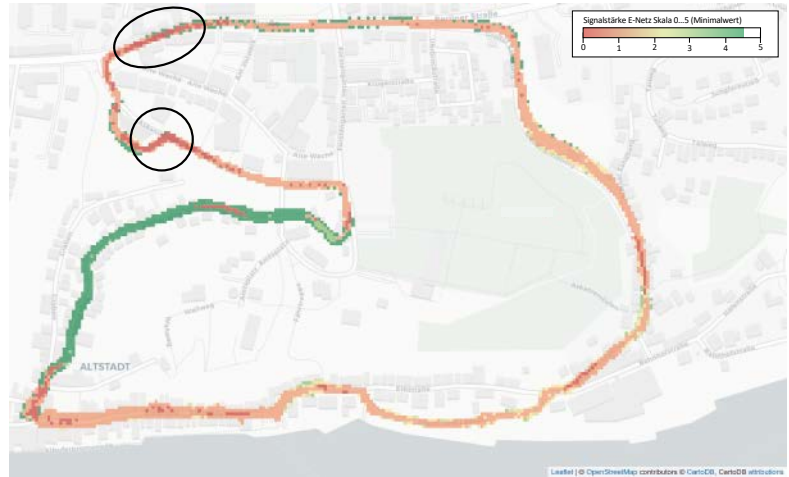


Bild 12: Minimale Signalstärke im O2/Telefonica Netzwerk, Stillstände aufgrund fehlender Netzwerkverbindung im Bereich der kreisförmigen Markierungen

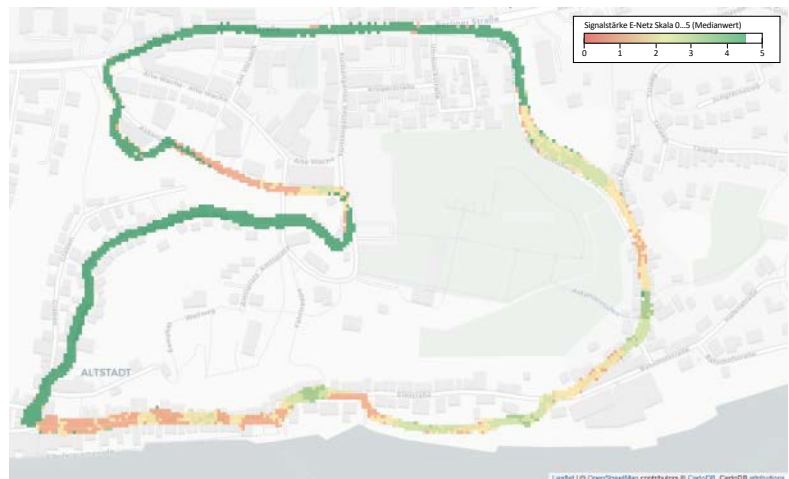


Bild 13: Median der Signalstärke im O2/Telefonica Netzwerk

# Durchstarten mit der digitalen V+T !

[www.VTdigital.de](http://www.VTdigital.de)

**ESV ERICH SCHMIDT VERLAG**  
Auf Wissen vertrauen