

Transportroboter in automatisierten Shuttles



© Dominik Pietzko

Bislang wurden Personen- und Güterverkehr meist getrennt voneinander betrachtet. Im Sinne einer zukunftsfähigen Mobilität, die auf eine Reduzierung des Verkehrsaufkommens und Steigerung der Auslastung von Transportkapazitäten abzielt, wird der kombinierte Personen- und Warentransport im Projekt TaBuLa-LOG untersucht. Ein Aspekt dabei ist die Integration eines Transportroboters, der von Forschern der Technischen Universität Hamburg entwickelt wurde.

Außerhalb von Ballungsräumen ist das Angebot des öffentlichen Personennahverkehrs mit Bussen häufig unbefriedigend, regelmäßig gering ausgelastet und bedarf hohen Zuschüssen der öffentlichen Hand [1]. Im Kreis Herzogtum Lauenburg wird daher im Projekt TaBuLa LOG erforscht, wie das Nahverkehrsangebot in der Zukunft durch autonomes Fahren ergänzt und attraktiver gestaltet werden kann [2]. Dabei ist ein Aspekt der Transport von Gütern mithilfe von Transportrobotern, die Teilstrecken in automatisiert fahrenden Shuttles zusammen mit Fahr-

gästen zurücklegen und so Auslastung und Wirtschaftlichkeit steigern könnten. TaBuLa ist die Abkürzung für „Testzentrum für autonome Busse im Kreis Herzogtum Lauenburg“. Damit wird umschrieben, dass in einer Testumgebung im Kreis Herzogtum Lauenburg Tests für den Einsatz von automatisierten beziehungsweise autonomen Bussen durchgeführt werden. Der Zusatz „LOG“ steht für die Integration einer Logistik-Komponente in Form eines Transportroboters mit der Bezeichnung Laura für „Lauenburgs Automatisierte Roboter Auslieferung“. An der Tech-

nischen Universität Hamburg (TUHH) werden am Institut für Technische Logistik die Transportroboter entwickelt. Das Institut für Verkehrsplanung und Logistik untersucht Einsatzmöglichkeiten und Akzeptanz des kombinierten Personen- und Warentransports.

REALLABOR IN LAUENBURG AN DER ELBE

Im Projekt wurde als beispielhafter Anwendungsfall der Transport interner Behördenpost der Stadtverwaltung aus-

AUTORIN UND AUTOREN



Marko Thiel, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Robotikingenieur am Institut für Technische Logistik der TUHH in Hamburg.



Dipl.-Ing. Matthias Grote
ist Projektkoordinator, Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Sicherheitsauditor für Straßen am Institut für Verkehrsplanung und Logistik der TUHH in Hamburg.



Manuel Schrick, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Softwarearchitekt am Institut für Technische Logistik der TUHH in Hamburg.



Sandra Tjaden, M. Sc.
ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Logistikexpertin am Institut für Verkehrsplanung und Logistik der TUHH in Hamburg.

gewählt. Zwischen verschiedenen Standorten der Verwaltung in Lauenburg/Elbe wurden dabei drei Logistikszenerarien im täglichen Verkehr erprobt, **BILD 1**:

Szenario 1: Transport der Post durch eine Person im automatisierten Shuttle und Übergabe an der Zieladresse,

Szenario 2: Transport im automatisierten Shuttle mit direkter Übergabe der Post an der entsprechenden Haltestelle an eine Empfangsperson sowie

Szenario 3: Vollständiger Transport der Post im Transportroboter inklusive dessen Mitfahrt im automatisierten Shuttle.

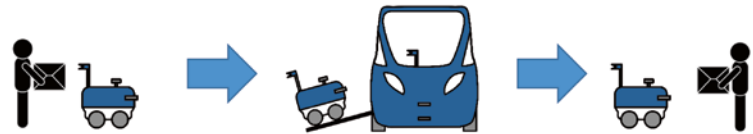
1) Manueller Transport



2) Shuttlebasierter Transport



3) Automatisierter Transport



Erste Meile

Hauptlauf

Letzte Meile

BILD 1 Testszenerarien für den Transport der Hauspost (© TUHH)

Dabei wurde die Post am Morgen im Posteinlagerungszentrum unter Nutzung eines Shuttles abgeholt und zum Rathaus geliefert. Nach der Sortierung der Post erfolgte die Verteilung

- zwischen den Verwaltungsgebäuden im direkten Umfeld und
- unter Mitbenutzung eines Shuttles zum weiter entfernten Elbschiffahrtsmuseum und zurück.

Die Herausforderungen für Shuttle und Transportroboter in der historischen Stadt gestalteten sich vielfältig: Bundesstraße mit Lichtsignalanlagen, verkehrsberuhigter Bereich mit hohem Aufkommen touristischer Personen, diverse Fahrbahnbeläge mit in Teilen Großsteinpflaster, schmale und steile Altstadtgasen und bewaldete Bereiche sowie Über- und Unterführungen. [3]

EINSATZ IM SHUTTLE

Mithilfe der Shuttles wurde der Aktionsradius der Transportroboter erweitert und gleichzeitig die Auslastung der Buslinie durch den integrierten Warentransport gesteigert. Als Shuttle wurden zwei Minibusse des Typs Arma DL4 4WD vom Hersteller Navya eingesetzt, die als People Mover für den Öffentlichen Personennahverkehr zugelassen wurden [4]. Der

Automatisierungsgrad gemäß SAE International kann der bedingten Automatisierung (SAE-Level 3) zugeordnet werden. Es wurden mit bis zu 18 km/h von 2019 bis 2021 rund 7463 km im Mischverkehr zurückgelegt und 4664 Fahrgäste unfallfrei befördert.

Für die Erweiterung des Linienbusbetriebs um den Warentransport wurden Anpassungen notwendig: Für die zusätzliche Einrichtung von Haltestellen wurden verkehrsbehördliche Anordnungen und eine Ergänzung der Genehmigung nach Personenbeförderungsgesetz sowie eine Anpassung des Fahrplans vorgenommen. An zwei Haltestellen konnte ein barrierefreier Ausstieg über den Bau von Haltestellenpodesten realisiert werden. An den Shuttles, Lichtsignalanlagen und Haltestellen wurden Module installiert, die die Möglichkeit bieten, mittels Bluetooth Aktionen auszulösen, wie zum Beispiel das Anfordern einer Grünphase an einer Lichtsignalanlage.

LETZTE MEILE PER TRANSPORTROBOTER

Transportroboter für einen Einsatz auf Straßen oder Gehwegen stehen bisher nicht einzeln zum Verkauf. Daher mussten von der TUHH geeignete Transpor-

roboter-Prototypen neu entwickelt und aufgebaut werden, dargestellt in **BILD 2**.

GENEHMIGUNG

Im Sinne des deutschen Straßenverkehrsgesetzes (StVG) sowie der Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV) zählen auch kompakte Transportroboter zu den Kraftfahrzeugen, da sich diese maschinenbetrieben und nicht dauerhaft spurgeführt im öffentlichen Raum bewegen (§ 1 StVG und § 2 FZV). Sofern eine bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit von 6 km/h nicht überschritten wird, bleiben solche Fahrzeuge aber zulassungs- und betriebserlaubnisfrei (§§ 1 und 4 FZV).

Für den Betrieb der Transportroboter mussten zwei Ausnahmegenehmigungen eingeholt werden: Zum einen für Abweichungen von den Bau- und Betriebsvorschriften der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO), zum anderen zur Nutzung der Gehwege in Abweichung von der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). Die Beantragung der Ausnahmegenehmigungen erfolgte in enger Abstimmung mit den zuständigen Behörden auf Kommunal- und Landesebene. Grundlage der Anträge für Ausnahmegenehmigungen waren Gutachten der TÜV Nord Mobilität. Im Rahmen der Begutachtung wurde die Übereinstimmung der Roboter mit den Vorgaben der StVZO - sofern anwendbar - sichergestellt. Darüber hinaus musste insbesondere für die Genehmigung automatisierter Fahrfunktionen eine angemessene Anwendung kraftfahrzeugspezifischer Industrienormen und Spezifikationen nachgewiesen werden. Dazu zählten sowohl die Bereiche Funktionale Sicherheit (ISO 22626) als auch Sicherheit der Sollfunktion (ISO/PAS 21448). Teil des in diesem Kontext erstellten Sicherheitskonzepts ist die durchgehende Begleitung und Überwachung durch geschultes Personal.

HARDWARE

Als konstruktive Grundlage der Transportroboter dient eine mit Fail-Safe-Bremsen ausgestattete Jackal-Roboterbasis des Herstellers Clearpath Robotics. Darauf setzt ein Aluminiumrahmen mit Seitenpanels aus Acrylglasplatten auf. Bei der weiteren Ausgestaltung wurden die Vorgaben der StVZO entsprechend berücksichtigt, beispielsweise bei der



BILD 2 Prototyp Laura beim Einfahren in das Shuttle (© Dominik Pietzko)

Auslegung des Bremsverhaltens, durch Abrundung der Außenkanten, Anbringung von Beleuchtung und Reflektoren oder elektromagnetische Abschirmung von Bauteilen und Leitungen. Das kleine Fahrzeug ist 51 cm lang, 43 breit und 62 hoch und fährt maximal 6 km/h, also in etwa Schrittgeschwindigkeit. Der Laderaum ist für den Transport eines wechselbaren Euronormbehälters ausgelegt, der ein Warenvolumen von 20 l mit einer maximalen Gesamtmasse von 3 kg fasst.

Die Transportroboter sind mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet. Wesentlicher Bestandteil ist ein mehrlagiger

Laserscanner, der sowohl zur Lokalisierung als auch zur Erkennung von Hindernissen im Fahrweg verwendet wird. Ergänzt wird die Hinderniserkennung durch vier aktive Stereokameras, die zu jeder Seite nach unten geneigt den Nahbereich der Roboter überwachen. Insbesondere bei der Navigation im Shuttle in unmittelbarer Nähe zu anderen Fahrgästen ist dies erforderlich. Als separates System zur Erkennung von Hindernissen dienen vier Ultraschallsensoren.

Eine Fernsteuerung der Roboter sowie ein Eingriff in die automatisierte Fahrt

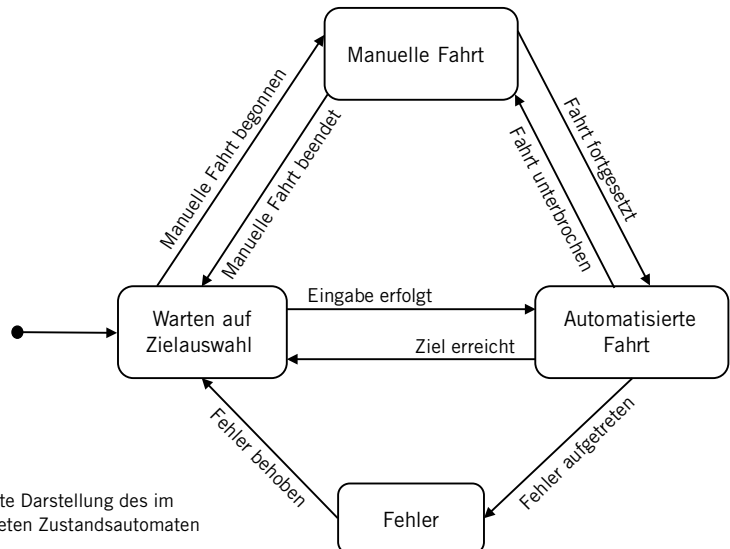
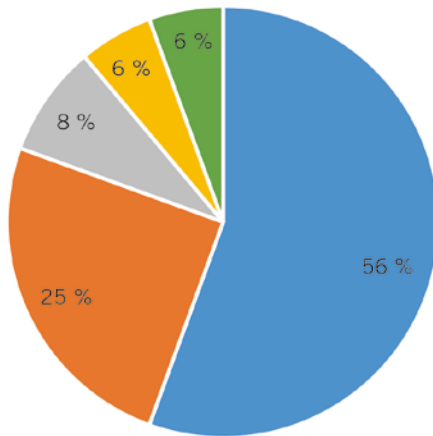


BILD 3 Vereinfachte Darstellung des im Roboter verwendeten Zustandsautomaten (© TUHH)



- Zu hohes Transportgewicht
- Shuttlestörungen
- Ausfall geschulten Personals
- Zu hohes Transportvolumen
- Wetterbedingungen (z. B. Regen)

BILD 4 Ermittelte Gründe der Störungen von Transporten (© TUHH)

ist jederzeit über einen Bluetooth-Controller möglich. Zusätzlich ist ein redundantes Funk-Not-Stopp-System verbaut.

SOFTWARE

Die Software der Transportroboter wurde auf dem Robot Operating System (ROS) aufbauend entwickelt. Für einzelne Funktionen, wie zum Beispiel die Lokalisierung, konnten bestehende ROS-Bibliotheken verwendet werden. Andere Teilfunktionen mussten neu implementiert werden.

Diese Teilfunktionen werden mithilfe einer neuen, stark nebenläufigen, ereignisbasierten Implementierung eines Zustandsautomaten verknüpft. Dabei handelt es sich um eine Softwarearchitektur, die es auf anschauliche Weise gestattet, einen komplexen Prozess in kleinere Einzelaufgaben aufzuteilen, **BILD 3**. Der stark nebenläufige Ansatz dieser Implementierung erlaubt es, alle einzelnen Teilfunktionen parallel zu betreiben und je nach Bedarf zu aktivieren oder zu deaktivieren. Durch die ereignisbasierte Architektur kann jeder Teilschritt des Transportprozesses jederzeit unterbrochen werden, um auf Fehlfunktionen zu reagieren und die automatisierte Fahrt gegebenenfalls zu unterbrechen. Damit wurde den Anforderungen des Sicherheitskonzepts Rechnung getragen.

Über einen integrierten Touchscreen wird das nächste Fahrtziel ausgewählt. Die Roboter können sich in einem vorher fest-

gelegten Fahrbereich frei bewegen, halten sich dabei aber an das Rechtsfahrgebot.

BEGLEITFORSCHUNG ZUM ROBOTERBETRIEB

Die Erprobung der Szenarien zum kombinierten Personen- und Warentransport lief von April bis November 2021. Insgesamt wurden 72 Testläufe durchgeführt, von denen 21 dem Szenario 3 zuzuordnen sind und mithilfe von Erhebungsbögen von Begleit- und Verwaltungspersonal dokumentiert wurden. Hierbei konnten Rahmendaten zu Wetter, Temperatur, Anzahl und Gewicht transportierten Sendungen sowie Prozesszeiten und Störfaktoren erhoben werden.

Generell war festzustellen, dass das Szenario 1 (manueller Transport) zeitlich am effizientesten und gegenüber Störungen äußerst resistent ist. Das Szenario 3 (automatisierter Transport) war als Anwendungsfall besonders interessant, bot aber verschiedene Störfaktoren: Zu hohes Transportgewicht oder Transportvolumen, Shuttlestörungen oder Ausfall geschulter Begleitpersonen. Wetterbedingungen stellten in dem Zeitraum dabei einen vergleichsweise geringen Störfaktor dar, **BILD 4**.

Die Befragungen von Fahrgästen und Bevölkerung nach dem Kennenlernen der Fahrzeuge zu deren Akzeptanz zeigen eine generell positive Einstellung gegenüber der Technik und dem neuen

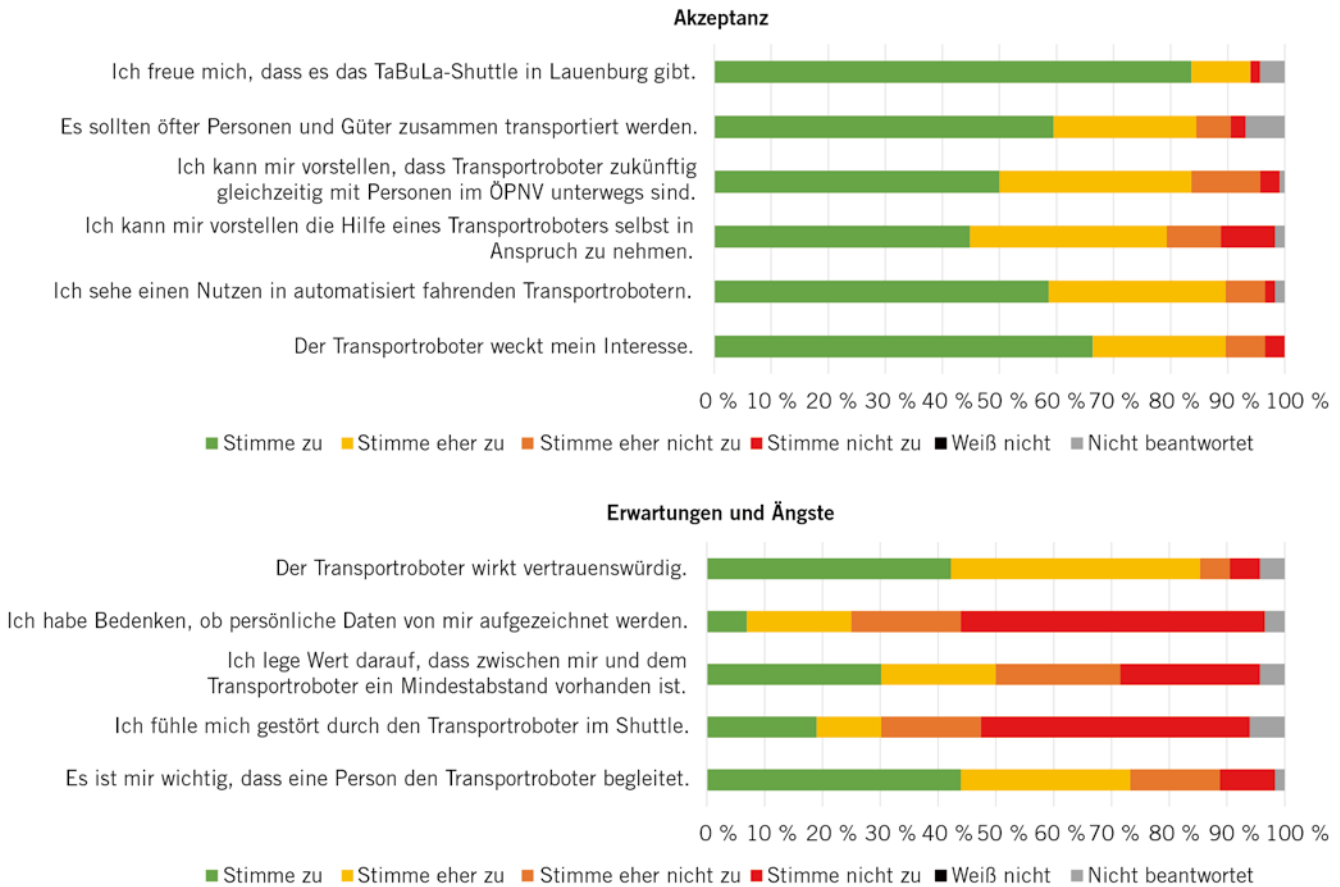


BILD 5 Ergebnisse aus Fahrgast- und Bevölkerungsbefragung (Stichprobe n = 116) (© TUHH)

Anwendungsfall. Auch herrscht Vertrauen gegenüber der Technologie, gleichzeitig bleibt es aber wichtig, dass die Fahrzeuge von Personen begleitet werden, BILD 5. Die Erkenntnisse bestätigen Befragungen aus dem Jahr 2020, die die Akzeptanz von automatisierten Shuttles untersucht hatten [5].

FAZIT

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse des TaBuLa-LOG-Projekts, dass es grundsätzlich rechtlich und technisch möglich ist, einen kombinierten automatisierten Betrieb von Transportrobotern und Shuttles zu realisieren. Zum jetzigen Zeitpunkt ist insbesondere die Ermittlung und Umsetzung relevanter Vorgaben aufwändig. Ein klarer rechtlicher Rahmen für mobile Roboter im öffentlichen Raum fehlt. Die frühe Einbeziehung eines Kraftfahrzeug-Sachverständigen sowie wichtiger Stakeholder ist anzuraten.

Auf Seiten der Roboter fehlen insbesondere kompakte, für den Einsatz im Stra-

ßenverkehr ausgelegte Bauteile und Sensoren. Die Vernetzung von Infrastruktur, Shuttles und digitalen Anwendungen hat gute Lösungen hervorgebracht, erwies sich aber bei Auftreten von Störungen durch eine Vielzahl von Komponenten und Beteiligten als Herausforderung.

Für kombinierte Logistikprozesse zeigen sich sinnvolle Anwendungsfälle bei hoher Akzeptanz in der Bevölkerung, weitergehende Untersuchungen zu Kosten und zur Übertragbarkeit stehen noch aus. Zukünftige Arbeiten sollten eine Ausweitung der Automatisierung verfolgen, wie die Entwicklung hin zum fernüberwachten Betrieb aus einer Leitzentrale ohne Begleitperson vor Ort. Dabei spielt die Erprobung von nutzenstiftenden und nachhaltigen logistischen Anwendungsfällen eine wichtige Rolle.

LITERATURHINWEISE

- [1] Muth, F.: Hat der klassische ÖPNV ausgedient?. In: Der Nahverkehr, Ausgabe 6 (2018), S. 28–34
- [2] Grote, M.; Röntgen, O.: Kosten autonom fahrender Minibusse. In: ECTL working paper 54. Hamburg: TUHH, Universitätsbibliothek, 2021
- [3] Thiel, M.; Tjaden, S.; Schrick, M.; Rosenberger, K.; Grote, M.: Requirements for robots in combined passenger/freight transport. Hamburg International Conference of Logistics (HICL), 22.–24. September 2021
- [4] Böckler, L.; Grote, M.; Wolf, J: Genehmigungsprozesse beim Einsatz von automatisierten Shuttle-Bussen im ÖPNV am Beispiel des Projektes TaBuLa in Lauenburg/Elbe. In: ECTL working paper 53. Hamburg: TUHH, Universitätsbibliothek, 2021
- [5] Mantel, R.: Akzeptanz eines automatisierten Shuttles in einer Kleinstadt. In: Journal für Mobilität und Verkehr, Ausgabe 8 (2021), S. 25–35

DANKE

Die Technische Universität Hamburg (TUHH) und der Kreis Herzogtum Lauenburg werden mit 1,8 Millionen Euro durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur im Rahmen der Förderlinie „Ein zukunftsfähiges, nachhaltiges Mobilitätssystem durch automatisiertes Fahren und Vernetzung“ gefördert.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 Test now for 30 days free of charge:
www.atz-worldwide.com