

# Autonome Kleinstfahrzeuge integrieren

## Kooperatives Steuerverfahren zur Integration kleiner mobiler Roboter in den verkehrssicheren und qualitätsoptimierten Verkehrsablauf und Implementierung in einer Laborumgebung

Automatisiertes Fahren, kooperative Systeme, Straßenverkehr, V2X-Kommunikation

Technologien der Robotik und der Fahrzeugindustrie wachsen immer mehr zusammen: Mobile autonome Kleinstfahrzeuge und Roboter werden zukünftig den Straßen- und Verkehrsraum nutzen und diesen mit anderen Verkehrsteilnehmern teilen. Dieser Beitrag beschreibt am Beispiel eines Lieferroboters, kleine mobile Roboter sicher in den Verkehrsablauf integriert werden können.

Christian Wille, Sten Ruppe, Daniel Wesemeyer, Hermann Neuner

**K**ooperative Systeme und das automatisierte und vernetzte Fahren werden die Mobilität innerhalb der nächsten Dekade maßgeblich beeinflussen. In absehbarer Zeit werden teil-, hoch- und vollautomatisierte Personalfahrzeuge Bestandteil der alltäglichen Mobilität sein. Weitere Mobilitätsteilnehmer könnten sich in naher Zukunft im Bereich der autonomen Kleinstfahrzeuge bzw. in der Robotik etablieren. Vorstellbar sind beispielsweise kleine Lieferroboter, wie sie bei Zulieferdiensten oder Paketdienstleistern zum Einsatz kommen könnten, Rollstühle mit automatisierten Fahrfunktionen [1], Roboterblindenhunde [2] oder automatisiert fahrende Abfallbehälter [3]. Diese neuen Kleinstfahrzeuge werden und müssen in der Lage sein, den Verkehrsraum autonom zu durchqueren. Insbesondere in der Einführungsphase wird es Bereiche geben, in denen die autonome Fortbewegung nicht möglich ist. Aktuell löst ein Betreiber von Lieferrobotern das Überwinden von schwierigen Kreuzungsbereichen über eine Remote-Steuerung [4].

An neuralgischen Kreuzungen, die von unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern wie Straßenbahnen, Bussen, Fußgängern, Radfahrern, Autofahrern, Einsatzfahrzeugen durchquert werden, bestehen die Herausforderungen, einerseits den sicheren Verkehrsablauf zu gewährleisten und andererseits den Verkehr qualitätsoptimiert zu organisieren. Letzteres adressiert unter anderem die Reduzierung der Wartezeit für alle Verkehrsteilnehmer und die Reduzierung von Emissionen.

Für eine erfolgreiche Integration von autonomen Kleinstfahrzeugen in den bestehenden Verkehrsraum ist neben der Nutzerakzeptanz und der politischen Unterstützung auch der Nachweis zur Aufrechterhaltung des

sicheren und qualitätsoptimierten Verkehrsablaufs ein relevanter Punkt.

Eine Lösung besteht darin, autonome Kleinstfahrzeuge aktiv in den Koordinierungsablauf der Kreuzungen einzubinden. Eine sehr gute Detektion des Verkehrsgeschehens im Umfeld einer Kreuzung ermöglicht die Aufrechterhaltung eines hohen Niveaus der Verkehrssicherheit, indem diese Umfelddaten und eigene Zustandsinformationen mit den Verkehrsteilnehmern geteilt werden. Weiterhin kann das autonome Kleinstfahrzeug die geplanten Fahrmanöver ebenfalls der Kreuzungskoordination mitteilen. Das DLR hat im Rahmen seiner Forschungsaktivitäten ein *kooperatives Steuerverfahren* für Lichtsignalanlagen entwickelt, das mit einem bidirektionalen Informationsaustausch agiert. Dieses Verfahren wurde im Projekt VITAL validiert und die Marktfähigkeit nachgewiesen [5].

### Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation

International wurden zahlreiche Standards entwickelt, die Netzwerkarchitekturen und Protokolle für die Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (kurz V2X, Car2X, C2X) definieren. In Europa werden diese Standards vorrangig durch das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) publiziert.

V2X-Nachrichten werden zwischen Empfängern über den erweiterten WLAN-Standard IEEE 802.11p [6] im 5-GHz-Frequenzbereich ausgetauscht. An V2X-Kommunikation über Mobilfunk wird ebenfalls geforscht. Studien [7] zeigen, dass LTE (Long Term Evolution, Mobilfunkstandard der dritten Generation) zwar höhere Latenzzeiten als die Kommunikation über 802.11p erreicht, dafür jedoch eine bessere Skalierbarkeit besitzt und eine

Kommunikation über große Entfernungen ermöglicht. Die 5G-Mobilfunktechnologie (fünfte Mobilfunkgeneration) verspricht Datenraten von bis zu 10 GBit/s und Latenzzeiten von unter 1 ms. Einen großen Vorteil verspricht die Möglichkeit von Ad-hoc-Netzen, wie sie bereits über IEEE 802.11p möglich sind.

Der Standard ETSI ITS G5 [8, 9] beschreibt die Architektur und Netzwerkmechanismen für V2V- (Fahrzeug zu Fahrzeug) und V2I-Kommunikation (Fahrzeug zu Infrastruktur, wie z.B. Roadside Units) im WLAN-Standard IEEE 802.11p. Die ITS G5-Architektur basiert auf einigen spezifischen Datentypen, wie der Cooperative Awareness Message (CAM), der Decentralized Environmental Notification Message (DENM) oder der Signal Phase and Timing Message (SPaT). Diese Nachrichtentypen sind generisch und von allen ausgerüsteten Fahrzeugen zu versenden. V2X-Nachrichten auf Basis von 802.11p erreichen durch direkte end-to-end-Kommunikation Latenzzeiten von unter 100 ms, sind allerdings auch nur für die Kommunikation über kurze Distanzen (bis zu mehreren hundert Metern) ausgelegt. Für den nachfolgend beschriebenen Lösungsansatz wurde das standardisierte CAM- und SPaT-Nachrichtenprotokoll verwendet.

### Kooperative Kreuzungssteuerung

Es gibt verschiedene Formen von Steuerungsverfahren für Lichtsignalverfahren (kurz LSA), die sich grundsätzlich in statische und dynamische Steuerungsverfahren unterscheiden lassen. Die älteste und einfachste Form ist die Festzeitsteuerung. Diese gehört zu den statischen Steuerungsverfahren und wiederholt zyklisch fest in einem Signalzeitenplan definierte Schaltmuster. Aufgrund dieser festen Definition kann das Verfahren jedoch nicht auf Schwankungen der Verkehrsnachfrage reagieren. Hier setzen dynamische Steuerungsverfahren wie zeitabhängige und verkehrsabhängige Steuerungen an. Bei zeitabhängigen Steuerungen werden für unterschiedliche Tageszeiten verschiedene Signalprogramme hinterlegt, die an die verkehrlichen Gegebenheiten der jeweiligen Tageszeit angepasst sind. Verkehrsabhängige Steuerungen nutzen hingegen direkt gemessene Verkehrsdaten zur Steuerung. Hier lassen sich wiederum regelbasierte und modellbasierte Steuerungen unterscheiden. Verkehrsabhängige regelbasierte Steuerungen nutzen Daten von Detektoren, z.B. an Knotenpunktzufahrten, für die Verarbeitung in einer Entscheidungslogik. Modellbasierte Steuerungen verwenden zur Optimierung von Zielgrößen ein zwischengeschaltetes Verkehrsmodell. In Deutschland sind regelbasierte Steuerungen am weitesten verbreitet. Wichtige Regelungen und gesetzliche Grundlagen sind die Straßenverkehrsordnung (StVO), die Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) [10] und das Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [11]. Im Projekt UR:BAN wurde u.a. ein Leitfaden zur Einrichtung kooperativer Systeme [12] erstellt.

In Hinblick auf zukünftig neu zur Verfügung stehende Verkehrskenngrößen (z. B. durch V2X-Daten) und der Möglichkeit, bidirektional Daten zwischen der LSA und dem Fahrzeug auszutauschen und für die Steuerung nutzen zu können, hat das DLR ein *kooperatives Steuerungsverfahren* namens AGLOSA entwickelt [13]. Beim *kooperativen Steuerungsverfahren* wird eine verkehrsabhängige Steuer-

ung mit einer GLOSA-Funktion (Green Light Optimized Speed Advisory) verknüpft. Fahrzeuge in den Zufahrten werden frühzeitig erfasst und in eine Verkehrssimulation eingesetzt. Im nächsten Schritt werden die Ankünfte der Fahrzeuge an ihren jeweiligen Haltebahnen prognostiziert. Anhand dieser prognostizierten Ankünfte werden optimale Schaltzeitpunkte und Freigabezeiten berechnet. Der Optimierungsalgorithmus kann verschiedene verkehrliche Kenngrößen berücksichtigen (z. B. Verlustzeit, Anzahl der Halte). Über die bidirektionale Verbindung werden die Schaltzeitpunkte zur Geschwindigkeitsanpassung an die Fahrzeuge übermittelt. Das Verfahren eignet sich besonders gut zur Berücksichtigung vernetzter Fahrzeuge mit Einrichtungen zur V2X-Kommunikation, kann aber auch mit konventionellen Detektoren (z. B. Induktionsschleifen, Magnetfeldsensoren, Kameras) betrieben werden, allerdings ohne direkte Rückkommunikation zu den Fahrzeugen. Für den nachfolgend beschriebenen Lösungsansatz wurde das DLR-Steuerverfahren verwendet.

### Systemaufbau

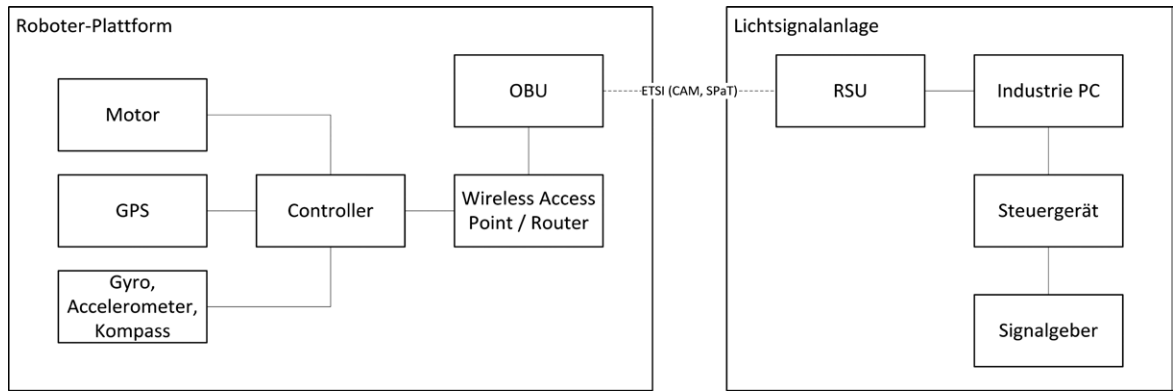
Die zugrundeliegende Idee basiert auf einem Entwurf und der Realisierung eines Systemaufbaus, der es ermöglicht, einen Roboter mit einem *kooperativen Steuerungsverfahren* interagieren zu lassen. Dafür wurde der Systemaufbau (vgl. Bild 1) so gestaltet, dass der Roboter dem LSA-Steuergerät an der Kreuzung über standardisierte V2X-Nachrichten seine Position mitteilt. Das LSA-Steuergerät übermittelt dem Roboter im Gegenzug die aktuellen Zustände der LSA-Signalgruppen sowie deren Restlaufzeiten.

Als Roboter wurde die Plattform Jaguar 4x4 Wheel der Firma Dr Robot Inc. eingesetzt (Spezifikationen vgl. *Tabelle 1*). Um den Austausch von V2I-Nachrichten zu ermöglichen, wurde am Access Point des Roboters die Testplattform LinkBird-MX [14] der Firma NEC als On-Board-Unit (OBU) angeschlossen.

Für die Verkehrssteuerung kam das Steuergerät C940V der Firma Siemens zur Anwendung. Prinzipiell ist fast jedes LSA-Steuergerät einer neueren Bauart verwendbar, sofern Einfluss auf das Signalprogramm und die Detektorzuordnung genommen werden kann. Aufgrund der benötigten Rechenleistung für die Simulation und die Optimierung lief das *kooperative Steuerungsverfahren* nicht direkt auf dem Steuergerät, sondern auf einem Industrie-PC, dem Modell Powerbox 100 der Firma Spectra. Einen Einfluss auf die Phasenwahl und den Zeitpunkt des Phasenwechsels im LSA-Steuergerät nahm das *kooperative Steuerungsverfahren* über einen speziell dafür eingerichteten Detektoranschluss im LSA-Steuergerät [5].

Zum standardisierten Nachrichtenaustausch zwischen der LSA und dem Roboter wurde am Industrie-PC ebenfalls ein LinkBird-MX als Roadside-Unit (RSU) angeschlossen. Somit standen dem *kooperativen Steuerungsverfahren* alle nötigen Informationen aus den V2I-Nachrichten zur Verfügung. Informationen über Anwesenheit, Position und Geschwindigkeit der Roboter-Plattform wurden durch die OBU generiert und im Format Cooperative Awareness Message (CAM) ausgetauscht. Die aktuelle Zustandsbeschreibung der Lichtsignalanlage sowie die Restlaufzeiten der Signalbilder waren in einer SPaT-Nachricht (Signal Phase and Timing) vorhan-

Bild 1: System-  
aufbau  
Alle Bilder: Autoren



den. Beide Nachrichtenformate wurden periodisch von der OBU (CAM-Nachricht) bzw. der RSU (SPaT-Nachricht) generiert.

Hauptmerkmale
Höhe: 265 mm
Breite: 573 mm
Länge: 615 mm
Gewicht: 20,5 kg
Radmotoren (24V): 4 Stück
eschwindigkeit: bis 11 km/h
Autonome Navigation mit GPS und 9 DOF IMU (Gyro/Accelerometer/Compass)
5 Hz GPS und 9 DOF IMU (Gyro/Beschleunigungsmesser/Kompass)
Bewegungs- und Sensorsteuerung

Tabelle 1: Hauptmerkmale der Roboter-Plattform [15]

**Szenario-Beschreibung**

Das für den Versuch verwendete Szenario ist in *Bild 2* dargestellt. Vorstellbar ist hier eine typische Situation in einem Industriegebiet, in der ein autonomer Lieferroboter eine Straße an einer Ampel überqueren muss.

Auf dem Gehweg fährt der Roboter auf die Ampel zu, während sich auf der Straße ein Fahrzeug nähert. Die Ampel sieht Dauergrün für Fahrzeuge vor, so dass das Grün für den Roboter nur durch eine Anforderung ausgelöst werden kann. Zu Beginn zeigt die Ampel hierbei grün für das Fahrzeug und rot für den Lieferroboter. Beide Fahrzeuge melden sich per CAM-Nachricht bei der RSU an. Das darauf laufende *kooperative Steuerungsverfahren* ermittelt, dass es vorteilhaft ist, das Fahrzeug warten zu lassen und dem Lieferroboter grün zu geben. Während der Umschaltbefehl an das Steuergerät gesendet wird, sendet die RSU aus dem *kooperativen Verfahren* heraus eine SPaT-Nachricht mit einer Geschwindigkeitsempfehlung an den Lieferroboter. Dieser passt seine Geschwindigkeit entsprechend an, um ohne Zwischenhalt über die Straße fahren zu können. Beim Fahrzeug wird auf eine Geschwindigkeitsempfehlung verzichtet, lediglich seine Position wird im *kooperativen Steuerungsverfahren* berücksichtigt. Die Ampel schaltet währenddessen in die Fußgängerphase um, das Fahrzeug hält an der Haltelinie an und der Lieferroboter kann ohne halten zu müssen die Straße queren. Nachdem der Lieferroboter die Fahrbahn gequert hat,

schaltet die Ampel wieder um und das Fahrzeug kann passieren.

**Feldtest und Ergebnisse**

Der Versuch wurde im LSA-Labor des DLR in Berlin-Adlershof durchgeführt (vgl. *Bild 3*). An einer befestigten Straße auf dem DLR-Gelände wurden die Signalgeber und das Steuergerät aufgestellt, so dass sie dem Systemaufbau und dem Aufbau im Szenario entsprechen. Die Fahrbahnbreite betrug an der Stelle des Versuchsaufbaus etwa 4 m. Der Roboter fuhr eine zuvor festgelegte Trajektorie ab, die 8 m vor der Fahrbahn begann und einige Meter dahinter endete. Das Fahrzeug näherte sich der LSA von seiner Startposition zwanzig Meter vor der Haltelinie.

Der Roboter startete mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s. Aufgrund der empfangenen SPaT-Nachricht wurde die Geschwindigkeit für 7 s auf 0,7 m/s reduziert. Nach dem Umschalten der LSA führte der Roboter seine Fahrt mit 3 m/s fort. Der Versuch wurde ebenfalls ohne Senden einer SPaT-Nachricht durchgeführt.

Im Ergebnis konnte die Kommunikation zwischen Roboter und Steuergerät sowie die Berücksichtigung des Roboters im *kooperativen Steuerungsverfahren* unter Laborbedingungen erfolgreich getestet werden. Aufgrund der übermittelten Positionsdaten war es möglich, dem Roboter Geschwindigkeitsempfehlungen zu geben, die ein stopploses Überfahren der LSA ermöglicht haben. Damit bekam der Roboter, anders als im Versuch ohne Geschwindigkeitsempfehlung, eine Grünphase zugesichert und konnte die Straße mit geringerer Verlustzeit queren. In dem Projekt VITAL konnte bereits ein Einsparpotential von bis zu 20 % an Verlustzeit bei Verwendung des kooperativen Steuerverfahrens aufgezeigt werden [5].

**Ausblick**

Bei zukünftigen Forschungsvorhaben im Bereich automatisierter Kleinstfahrzeuge im urbanen Kontext wird vor allem das Thema Verkehrssicherheit eine zentrale Rolle spielen. Insbesondere die Interaktion von Personen mit automatisierten Kleinstfahrzeugen sollte einer der zukünftigen Forschungsschwerpunkte sein. Hierbei muss aus Sicht der Autoren untersucht werden, wie Fußgänger und Radfahrer auf Kleinstfahrzeuge reagieren und wie man Konflikten vorbeugen und sie lösen kann, beispielsweise durch räumliche Trennungen. Auch sollten wirtschaftliche und städteplanerische Aspekte bei solchen Untersuchungen Berücksichtigung finden.

Ein weiterer interessanter Punkt für Forschungen ist die Untersuchung von Szenarien, in denen mehrere Roboter interagieren. Interessante Aspekte sind z.B. der Umgang mit Bewegungskonflikten sowie die Neuberechnung von Trajektorien und deren Auswirkungen auf die Signallaufzeiten.

Für die Planung von Trajektorien für Roboter ist es wichtig, Hindernisse detektieren zu können. Aus der Hindernisdetektion ergibt sich als mögliche Forschungsfrage, wie man mit auftretenden Hindernissen umgeht und die Daten der Kreuzungssteuerung bereitstellt. Auch das Verhindern von Diebstahl der Roboter oder deren Ladung ist ein relevanter Punkt.

Der nächste Schritt umfasst die Integration und den Test des vorgestellten Systems an einer realen Kreuzung und die Untersuchung der hiermit verbundenen Wechselwirkungen mit anderen Verkehrsteilnehmern. Wie automatisierte Kleinstfahrzeuge und Roboter in den Straßenverkehr integriert werden und ob sie ein wesentlicher Bestandteil der Mobilität der Zukunft sind, bleibt eine spannende Fragestellung. ■

**LITERATUR**

[1] Scudellari, Megan (2017): „Lidar-Equipped Autonomous Wheelchairs Roll Out in Singapore and Japan“, online unter: <https://spectrum.ieee.org/transportation/self-driving/lidar-equipped-autonomous-wheelchairs-roll-out-in-singapore-and-japan> (letzter Aufruf 18.03.2019)

[2] Chuang, Tzu-Kuan et al. (2018): „Deep Trail-Following Robotic Guide Dog in Pedestrian Environments for People who are Blind and Visually Impaired – Learning from Virtual and Real Worlds“, International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 21-25. Mai 2018, Brisbane

[3] Bauer, Markus (2017): „Autonomer Müllwagen – Volvo startet Feldversuch“, online unter: <https://www.eurotransport.de/artikel/autonomer-muellwagen-volvo-startet-feldversuch-8954156.html> (letzter Aufruf 18.03.2019)

[4] Redaktion Logistik heute (2016): „KEP: Hermes setzt auf Lieferroboter“, online unter: <https://logistik-heute.de/news/kep-hermes-setzt-auf-lieferroboter-12862.html> (letzter Aufruf 18.03.2019)

[5] Oertel, Robert; Erdmann, Jakob; Markowski, Robert; Schmidt, Willi ; Trumpold, Jan; Wagner, Peter (2018): „VITAL – Verkehrsabhängig intelligente Steuerung von Lichtsignalanlagen“, Straßenverkehrstechnik (09), Seiten 631-638. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. ISSN 0039-2219

[6] IEEE Standards Association: „IEEE Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007)“, 2010

[7] Mir, Z. H. und Filali, F.: „LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation“, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014

[8] ETSI: „ETSI EN 302 663 – Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5GHz frequency band“, 2012

[9] ETSI: „ETSI ES 202 663, European Profile Standard for the Physical and Medium Access Control Layer of Intelligent Transport Systems Operating in the 5 GHz Frequency Band, ver. 1.1.0“, 2009

[10] RiLSA – Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr, Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 2015

[11] Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 2015

[12] Kath, J.: „Leitfaden für die Einrichtung kooperativer Systeme auf öffentlicher Seite“, online unter: [http://www.urban-online.org/cms/upload/download/allgemein/abschlussdokumentation/Leitfaden\\_Einrichtung\\_kooperativer\\_Systeme/URBAN\\_KI-Leitfaden.pdf](http://www.urban-online.org/cms/upload/download/allgemein/abschlussdokumentation/Leitfaden_Einrichtung_kooperativer_Systeme/URBAN_KI-Leitfaden.pdf), TU München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, 2016

[13] Erdmann, Jakob (2013) „Kombination von Adaptiver LSA-Steuerung und GLOSA (AGLOSA)“, in: VIMOS Konferenz-Vorträge, VIMOS 2013, 4. Dez. 2013, Dresden, Deutschland

[14] NEC: „NEC LinkBird-MX – Test Platform for Evaluation of Vehicular Communication Protocols“, online unter: <http://www.nec.co.jp/press/en/0811/images/1301-01.pdf> (letzter Aufruf 18.03.2019)

[15] Dr Robot Inc.: „Jaguar 4x4 wheel specification“, online unter: [http://jaguar.drrobot.com/specification\\_4x4w.asp](http://jaguar.drrobot.com/specification_4x4w.asp) (letzter Aufruf 18.03.2019)

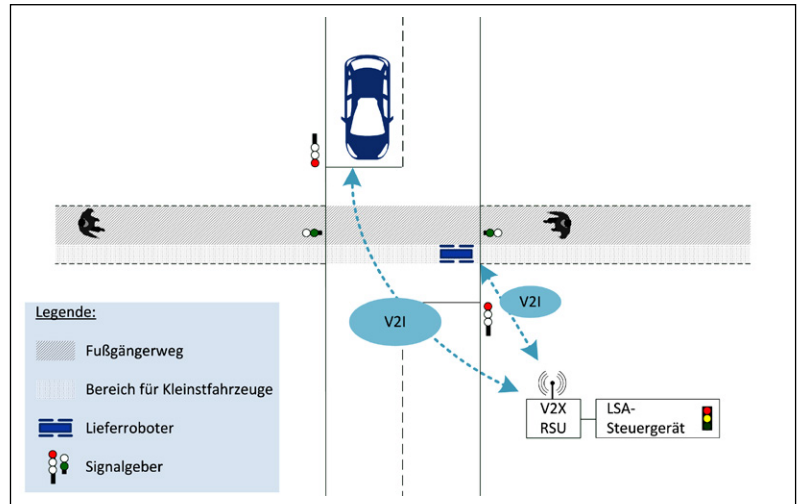


Bild 2: Darstellung des Szenarios



Bild 3: Versuchsaufbau auf dem DLR-Gelände in Berlin-Adlershof



**Christian Wille**  
 Institut für Verkehrssystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Berlin  
[christian.wille@dlr.de](mailto:christian.wille@dlr.de)



**Sten Ruppe**  
 Institut für Verkehrssystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Berlin  
[sten.ruppe@dlr.de](mailto:sten.ruppe@dlr.de)



**Daniel Wesemeyer**  
 Institut für Verkehrssystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Berlin  
[daniel.wesemeyer@dlr.de](mailto:daniel.wesemeyer@dlr.de)



**Hermann Neuner, Prof.**  
 Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Fachbereich 1: Ingenieurwissenschaften – Energie und Information, Berlin  
[hermann.neuner@htw-berlin.de](mailto:hermann.neuner@htw-berlin.de)