



Vernetztes Fahren in der Innenstadt

Vorteile, Herausforderungen
und Kommunikationsstrategien

Inhalt

Einleitung	3
Kooperatives Fahren und Platooning	5
Die Vorteile von Platooning für die Innenstadt	9
Zuverlässige, drahtlose Kommunikation für Platooning	11
Formation von Platoons im urbanen Raum	12
Kommunikationsstrategien	13
Fazit und Ausblick	17
Literatur	18

Impressum

Autor*innen

Dr.-Ing. Tobias Harges
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Software Innovation Campus Paderborn

Satz und Design

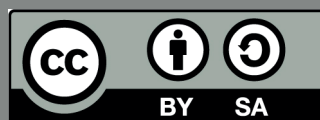
FIR e. V. an der RWTH Aachen

Bildnachweise

S. 1: © DWN Media – stock.adobe.com
S. 5: © Fokke Baarssen – stock.adobe.com
S. 8: © Sandu – stock.adobe.com
S. 13: © pkproject – stock.adobe.com
S. 17: © Ziyān – stock.adobe.com

Lizenzbestimmung/Copyright

Open Access: Dieses Whitepaper wird unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International (CC BY-SA 4.0) veröffentlicht (creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de).



Projekt DiSerHub
FIR e. V. an der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 55 | 52074 Aachen

E-Mail: projekt.DiSerHub@fir.rwth-aachen.de
diserhub.de

Einleitung

Das Verkehrsaufkommen hat in den letzten Jahrzehnten weltweit stark zugenommen¹. Dieser Anstieg ist mit verschiedenen negativen Auswirkungen verbunden. Die Emissionen von Treibhausgasen, Stickoxiden und Lärm haben stark zugenommen, was negative Folgen für die Umwelt und die menschliche Gesundheit hat.

Prognosen zufolge wird die Bevölkerung in städtischen Gebieten weiterwachsen und sich bis zum Jahr 2045 mehr als verdoppeln², was die oben genannten Probleme noch verschärfen wird. Wie in Abbildung 1 dargestellt, prognostizieren Van Audenhove et al.¹ einen Anstieg des städtischen Verkehrsaufkommens um 90 % zwischen 2010 und 2050. Nagy und Simon³ gehen von einem ähnlichen Anstieg des Verkehrsaufkommens bis 2050 aus.

Mit der Zunahme des Verkehrsaufkommens steigt auch die Zahl der Verkehrsunfälle (mit Ausnahme der COVID-19-Jahre). Nach Angaben der Europäischen Kommission⁴ ereignen sich die meisten tödlichen Unfälle auf Landstraßen (55 %) und auf städtischen Straßen (37 %), was die Wichtigkeit der Verbesserung

der Verkehrssicherheit in diesen Bereichen deutlich macht. Daten für Deutschland⁵ bestätigen dies (Abbildung 2). In einigen Jahren entfielen mehr als 70 % aller dokumentierten Unfälle auf städtische Gebiete, während der Anteil auf den außerstädtischen Straßen weniger als 30 % betrug.

Angesichts der wachsenden Probleme durch die zunehmende Verkehrsdichte und der Umweltverschmutzung werden in der aktuellen Forschung verschiedene Ansätze zur Lösung dieser Probleme untersucht. Dazu gehören die Substitution des konventionellen Verkehrs durch alternative Verkehrsmittel wie Fahrräder oder Elektroroller, die Elektrifizierung des Verkehrs zur Reduzierung der Emissionen und die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) bis hin zum autonomen Fahren. Autonomes Fahren auf SAE-Level 2 (teilautomatisiertes Fahren)⁶ ist durch ADAS, wie die adaptive Geschwindigkeitsregelung (Adaptive Cruise Control, ACC), die automatisch die Geschwindigkeit und den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug auf der Straße regelt, weit verbreitet. In den letzten Jahren wurden zunehmend

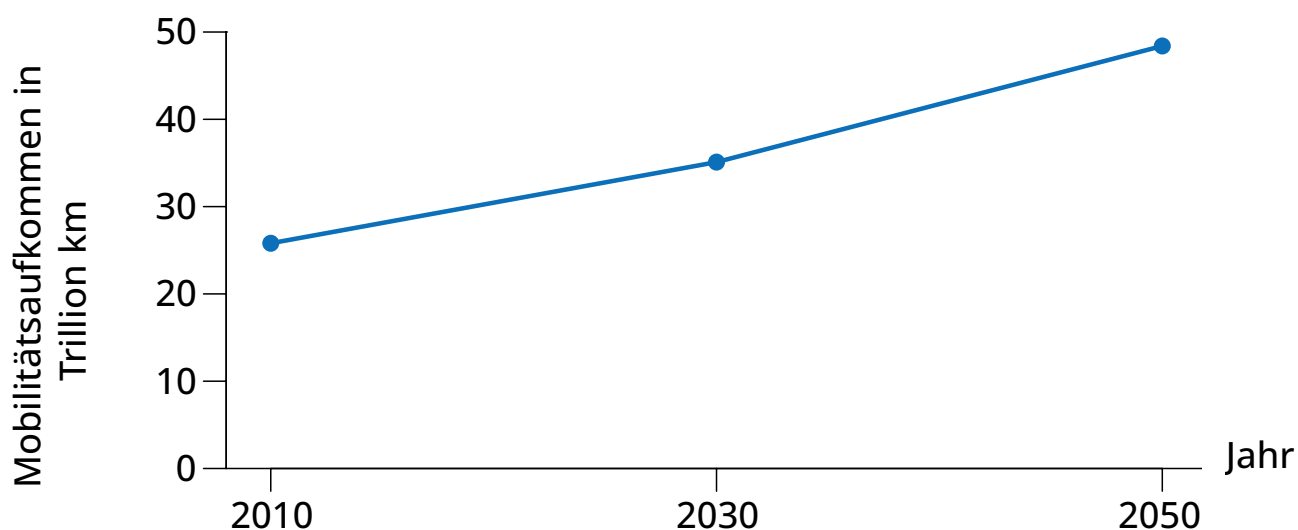


Abbildung 1: Städtische Mobilitätsnachfrage für die Jahre 2010, 2030 und 2050¹. © Tobias Hardes

Schritte in Richtung SAE-Level-3-Systeme (bedingte Automatisierung) unternommen.

Weitere Entwicklungen im Fahrzeugbereich beinhalten die Implementierung von Kommunikationsmöglichkeiten zwischen mehreren Fahrzeugen auf der Straße, wodurch das Konzept der vernetzten Fahrzeuge eingeführt wird.

In diesem Whitepaper werden die Konzepte vernetzter und kooperativer Fahrzeuge vorgestellt. Kooperative Fahrzeuge sind in der Lage, miteinander und mit der Infrastruktur zu kommunizieren. Sie tauschen Informationen über ihre Position, Geschwindigkeit und andere relevante Daten aus und können so gemeinsame Entscheidungen treffen. Kooperierende Fahrzeuge ermöglichen neue Anwendungen wie das sogenannte Platooning, bei dem eine Gruppe von Fahrzeugen perfekt aufeinander abgestimmt in einer Kolonne fährt. Platooning wurde ursprünglich für Autobahnen entwickelt, um den Verkehr sicherer und flüssiger zu gestalten. Doch auch für den Stadtverkehr bietet Platooning erhebliche Vorteile, wie aktuelle Forschungsergebnisse zeigen⁴.

Nach einer Einführung in die Konzepte des vernetzten Fahrens und des Platooning sowie einem Überblick über die bereits gut erforschten Vorteile für den Autobahnverkehr wird im Folgenden ein innovativer Forschungsansatz vorgestellt, der insbesondere die Vorteile des Platooning im innerstädtischen Verkehr untersucht. Eine zuverlässige drahtlose Kommunikation zwischen den vernetzten Fahrzeugen ist unerlässlich für den Einsatz von Platooning im urbanen Raum. Das Whitepaper fasst bisherige Forschungsansätze zur drahtlosen Kommunikation innerhalb eines Autobahn-Platoons zusammen. Darüber hinaus wird ein aktueller Forschungsansatz vorgestellt, der sich mit einer innovativen Kommunikationsstrategie für urbanes Platooning beschäftigt.

Zusätzlich wird in diesem Whitepaper dargestellt, wie Platoons in Innenstädten gebildet werden könnten. Abschließend bietet es ein Fazit sowie einen Ausblick auf die zukünftige Mobilität und intelligente Verkehrssysteme.

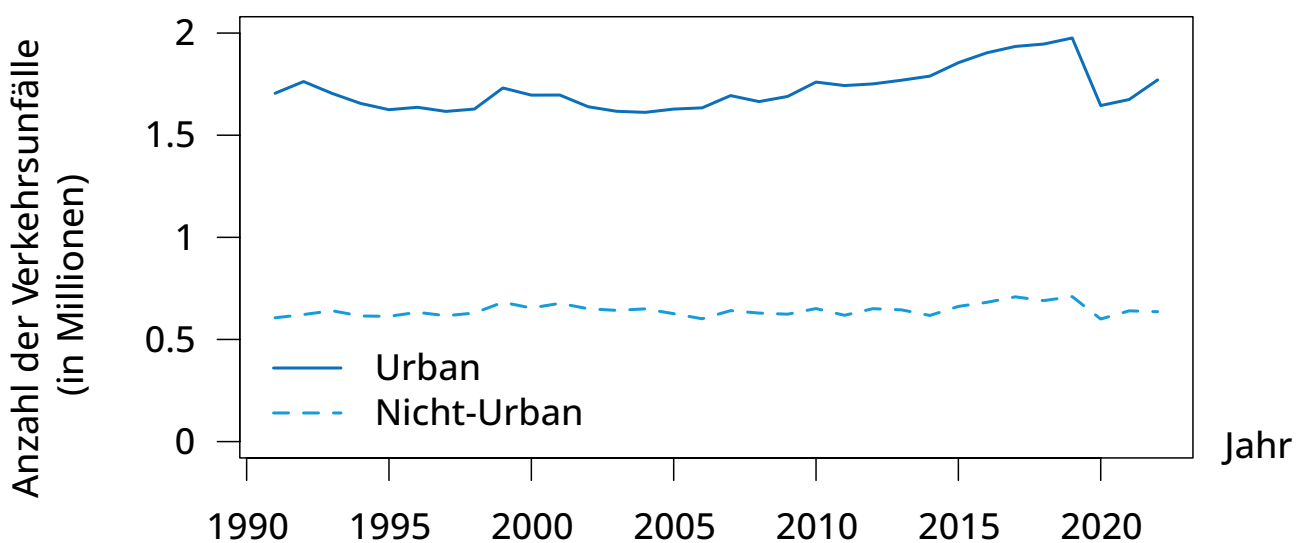


Abbildung 2: Straßenverkehrsunfälle in Deutschland für städtische und außerstädtische Gebiete. Die Daten stammen vom Statistischen Bundesamt⁵. © Tobias Hardes²⁴

4 • Vernetztes Fahren in der Innenstadt

Kooperatives Fahren und Platooning

Vernetzte Fahrzeuge können auf das Internet zugreifen und mit anderen Fahrzeugen oder der Infrastruktur kommunizieren. Die Kombination der Trends vom autonomen und vernetzten Fahren wird als kooperatives Fahren bezeichnet und führt zu Fahrzeugen, die vollständig autonom fahren und gleichzeitig kommunizieren können. Die Kooperation von Fahrzeugen wird mit Hilfe von Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs) realisiert. VANETs meint grob eine direkte (Device-to-Device, D2D) Kommunikation zwischen Fahrzeugen, ohne dass zentrale Infrastrukturelemente erforderlich sind. Die Kooperation zwischen Fahrzeugen ermöglicht die Implementierung einer Vielzahl von Anwendungen auf der Straße. Dazu gehören Infotainment-Funktionen, aber auch sicherheitskritische Anwendungen wie kooperative Kollisionsvermeidung, selbststeuerndes Kreuzungsmanagement und Platooning.

Die Anwendung des Platooning, also des kooperativen Konvois mehrerer Fahrzeuge, stellt eine anspruchsvolle und vielversprechende Anwendung für intelligente Verkehrssysteme (IVS) und kooperatives Fahren dar. Das Ziel des Platooning ist die Verbesserung der Verkehrssicherheit, der Verkehrseffizienz sowie die Verringerung der Umweltauswirkungen des Straßenverkehrs. Ein Platoon besteht aus einer beliebigen Anzahl von Fahrzeugen, die in einem Konvoi fahren. In einem solchen Platoon fahren die Fahrzeuge bei Autobahngeschwindigkeit nur wenige Meter zueinander. Die geringen Abstände zwischen den Fahrzeugen werden durch den Einsatz einer kooperativen adaptiven Geschwindigkeitsregelung (Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC) ermöglicht. Der CACC ist die nächsten Evolutionsstufe eines Adaptive Cruise Control (ACC). Ein CACC kann die Geschwindigkeit eines



Fahrzeugs in einem Platoon basierend auf Echtzeitdaten der bordeigenen Sensoren und von Daten, die über die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (V2V) gesammelt werden, anpassen. Diese Kombination ermöglicht es den Fahrzeugen eines Platoons, sich mit minimalen Abständen zwischen den Fahrzeugen auf der Straße synchron zu bewegen. Typische Abstände zwischen Fahrzeugen betragen dabei oftmals nur wenige Meter. Diese geringen Abstände zwischen den Fahrzeugen, die auch bei Autobahngeschwindigkeiten eingehalten werden, haben mehrere Vorteile, die Platooning zu einem attraktiven Konzept für die Mobilität im Straßenverkehr machen.

Ein Vorteil des geringen Abstands zwischen den Fahrzeugen bei hohen Geschwindigkeiten ist die bessere Auslastung der Straße. Aufgrund der Verzögerung, die durch die menschliche Reaktionszeit entsteht, müssen menschliche Fahrer einen sicheren Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einzuhalten. Obgleich der tatsächliche Abstand von diversen Faktoren abhängig ist, wie beispielsweise der Geschwindigkeit oder dem Gewicht des Fahrzeugs, den Witterungsverhältnissen oder dem Zustand des Fahrers, wird in der Regel davon ausgegangen, dass er unter guten Fahrbedingungen 2 s⁷ bis 3 s^{8, 9} beträgt (bezogen auf die Fahrgeschwindigkeit, somit bei 100 km/h ungefähr 56 m bis 83 m).

Ein zweiter Vorteil der verringerten Abstände zwischen den Fahrzeugen, ist die Reduktion des Luftwiderstands zwischen den Fahrzeugen, was zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und CO₂-Emissionen führt. Bei einem einzelnen Fahrzeug entstehen sowohl an der Front als auch am Heck des Fahrzeugs Widerstandskräfte, was zu einem höheren Kraftstoffverbrauch führt. Wenn jedoch zwei Fahrzeuge mit geringem Abstand zueinander fahren, kann das hintere Fahrzeug im Windschatten des vorderen fahren, was den Luftwiderstand an der Front verringert (das Fahrzeug nach hinten drückt) und somit den Kraftstoffverbrauch senkt¹⁰. Darüber hinaus profitiert das erste Fahrzeug von der fehlenden Turbulenzzone an seinem Heck (die das Fahrzeug ansaugt). Folglich steigt die Gesamtkraftstoffeinsparung eines Platoons mit der Anzahl der Fahrzeuge im Platoon, und weniger Fahrzeuge sind von den beiden Druckzonen gleichzeitig betroffen¹⁰ (Abbildung 3). Dieser Effekt ist bei Lkw noch ausgeprägter, da sie erstens im Vergleich zu Pkw einen viel höheren Kraftstoffverbrauch haben und zweitens eine größere Frontfläche mit einem höheren Luftwiderstand aufweisen. Verschiedene Projekte haben das Kraftstoffeinsparungspotenzial von Platooning untersucht. Das SATRE-Projekt¹¹ beispielsweise ergab Kraftstoffeinsparungen von 15 % für schwere Nutzfahrzeuge auf Autobahnen. Andere Studien ergaben eine Kraftstoffeinsparung von 5

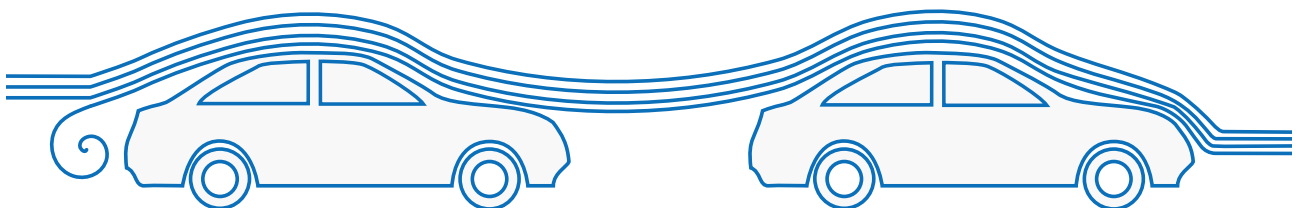


Abbildung 3: Durch die geringen Abstände werden die turbulente Tiefdruckgebiete am Heck und die Hochdruckzonen an der Front z. T. eliminiert – Grafik in Anlehnung an¹⁴

bis 8 %¹². Die Höhe der Einsparungen ist jedoch von mehreren Faktoren abhängig, beispielsweise von der Fahrgeschwindigkeit, dem Fahrzeugtyp oder der Verkehrsdichte.

Ein dritter Vorteil des Platooning ist die Verbesserung des Verkehrsflusses durch die koordinierte Bewegung von Fahrzeugen in einem Platoon (ähnlich wie bei einem Zug – nur auf der Straße), wodurch die Entstehung von Verkehrsschockwellen vermieden werden kann. Störungen des Verkehrsflusses, die sich entgegen der Fahrtrichtung ausbreiten, verursachen Kettenreaktionen, die zu Schockwellen führen¹³. Ein abruptes Bremsen eines Autofahrers führt zu einer Reaktion der nachfolgenden Fahrer, die nicht synchron, sondern verzögert (menschliche Unvollkommenheit) stattfindet und so zu einer Störung des Verkehrsflusses führt. Dadurch werden die Reaktionen möglicherweise noch stärker ausgeführt, um Kollisionen zu vermeiden. Obwohl

der Auslöser der Verlangsamung rasch wieder verschwindet, kann die daraus entstehende Welle des verlangsamten oder gestoppten Verkehrs für eine längere Zeit bestehen bleiben. Aus diesem Grund wird der Begriff „Phantomstau“ verwendet¹³. Ein entsprechendes Szenario wird in Abbildung 3 veranschaulicht. Durch die koordinierte Steuerung des Fahrverhaltens, wie sie beim Platooning erfolgt, lassen sich Schockwellen vermeiden, was zu einem effizienteren Verkehrsfluss führt.

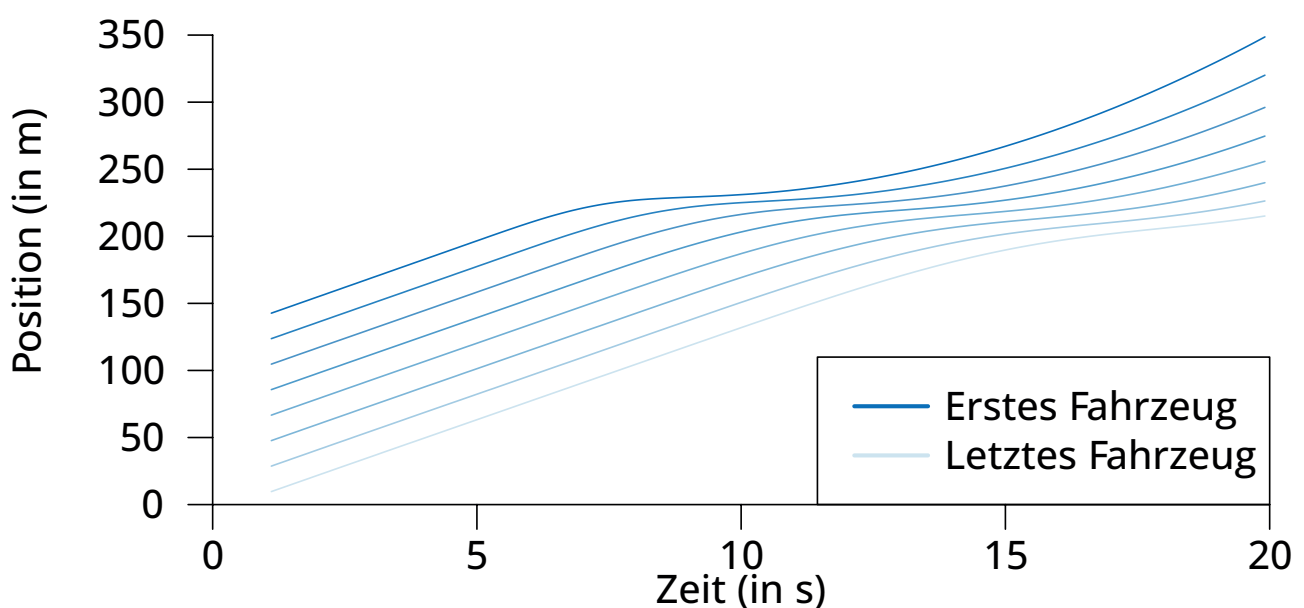


Abbildung 4: Formation einer Schockwelle. Das erste Fahrzeug bremst und verursacht eine Kettenreaktion.



Die Vorteile von Platooning für die Innenstadt

Daten aus der Literatur²⁸ zeigen, dass das Platooning-Konzept die Gesamtfahrzeit der einzelnen Fahrzeuge um durchschnittlich 14 % reduzieren kann. Dies ist in erster Linie auf die synchronisierte Beschleunigung (aufgrund des CACCs) der Fahrzeuge im Platoon zurückzuführen, wenn die Ampel auf Grün schaltet. Folglich erhöht die synchronisierte Beschleunigung den Durchsatz an der Kreuzung, so dass mehr Fahrzeuge die Kreuzung während der Grünphase überqueren können und somit die Gesamtfahrzeit verkürzt wird.

Im Gegensatz dazu beginnen manuell von Menschen gesteuerten Fahrzeuge ihre Fahrt nacheinander (zeitlich verzögert), was sich negativ auf den Verkehrsfluss auswirkt und zu einem kumulativen Zieh-

harmonikaeffekt führt. Obwohl das erste Fahrzeug an der Haltelinie unmittelbar nach dem Umschalten der Ampel auf Grün beschleunigt, beschleunigen die nachfolgenden Fahrzeuge mit einer kurzen Verzögerung, wodurch der Abstand zwischen den Fahrzeugen vergrößert wird. Von Menschen gesteuerte Fahrzeuge vergrößern diese Lücke noch weiter, da menschliche Fahrer stets einen hohen Sicherheitsabstand in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit einhalten müssen (im Vergleich zu einer CACC mit konstantem Abstand). Dadurch wird die Straßenauslastung reduziert, und weniger Fahrzeuge können die Kreuzung während der Grünphase passieren.

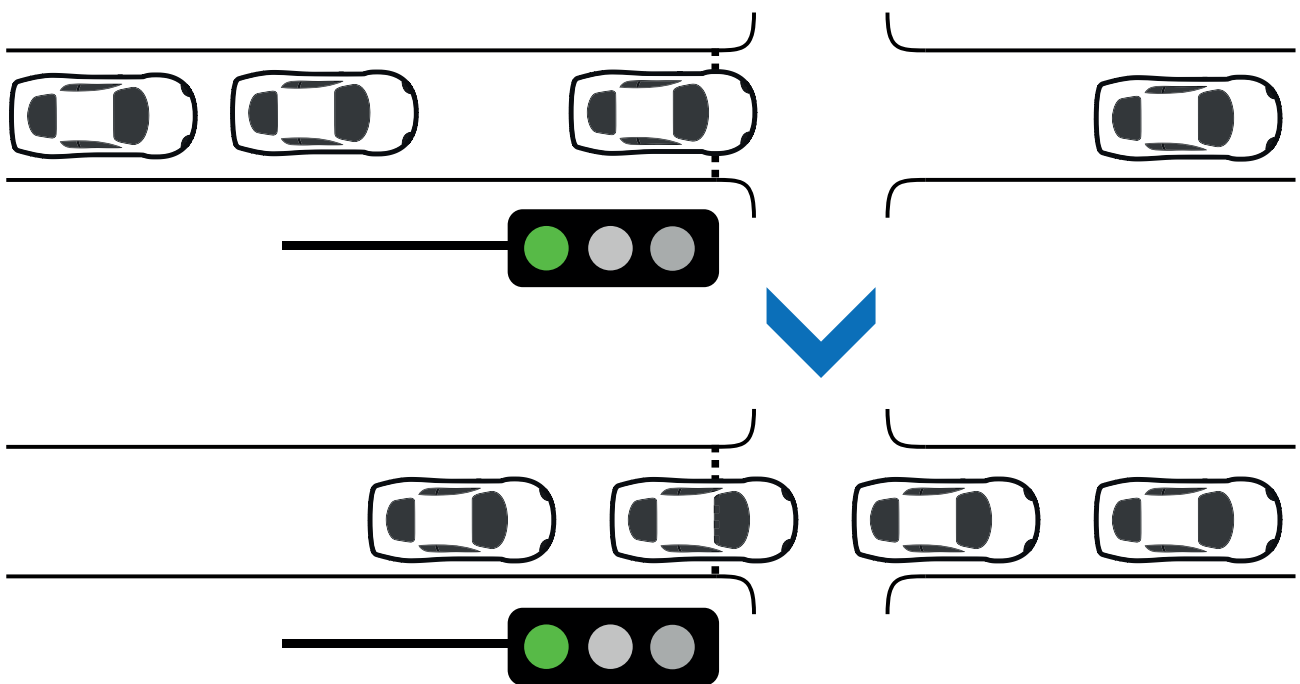


Abbildung 5: Ziehharmonika-Effekt: Durch Menschen gesteuerte Fahrzeuge reagieren mit Verzögerung und müssen einen Sicherheitsabstand einhalten. Ein Platoon fährt ähnlich wie ein Zug mit minimalen Abständen über die Kreuzung.
© Tobias Harges

Ähnliches ließ sich für den Treibstoffverbrauch feststellen. Die Daten zeigen hier, dass die Anwendung von Platooning den Kraftstoffverbrauchs im Durchschnitt um 15 % reduziert. Bei weiteren Untersuchungen wurde festgestellt, dass Fahrzeuge weniger oft vor einer roten Ampel halten müssen. Dies ist eine Folge des erhöhten Durchsatzes an der Kreuzung und der daraus resultierenden Verkürzung der Fahrzeit. Während im Leerlauf an einer roten Ampel nur wenig Kraftstoff verbraucht wird, müssen die Fahrzeuge im Grundkonzept mehrfach bremsen und beschleunigen, was zu einem höheren Kraftstoffverbrauch führt.

Die konkreten Vorteile des Platooning hängen von dem eingesetzten CACC ab, der ein Fahrzeug im Platoon steuert. Um Kollisionen zu vermeiden, benötigt das CACC regelmäßige Aktualisierungen von

den anderen Fahrzeugen im Platoon. Diese Aktualisierungen werden über Platooning-Beacons mittels drahtloser Kommunikation übertragen. Ein Platooning-Beacon enthält spezifische Daten, die für die jeweilige CACC-Implementierung benötigt werden. Aus verwandten Arbeiten¹⁴ geht hervor, dass ein CACC eine Aktualisierungsrate von 100 ms benötigt, um das Fahrverhalten seines Fahrzeugs an die sich ändernde Fahrzeugdynamik der anderen Fahrzeuge im Platoon anzupassen. Folglich sendet jedes Fahrzeug im Platoon alle 100 ms ein solches Platooning-Beacon. Daher ist eine zuverlässige drahtlose Kommunikation für den regelmäßigen Datenaustausch unerlässlich, um Platooning auf der Straße zu realisieren.

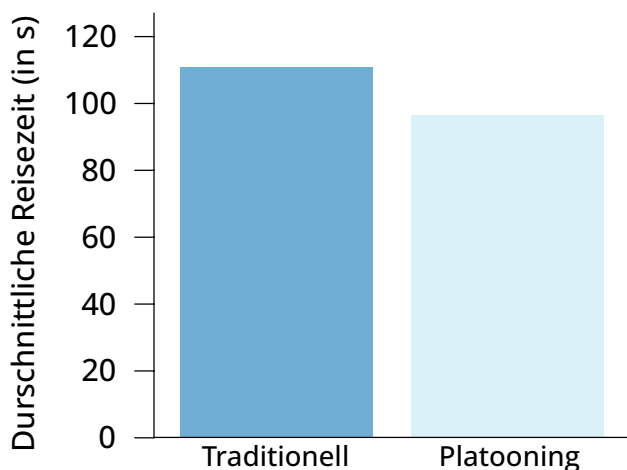


Abbildung 6: Durch Platooning lässt sich in Simulationen die durchschnittliche Reisezeit um ca. 17 % verringern. © Tobias Hardes²⁸

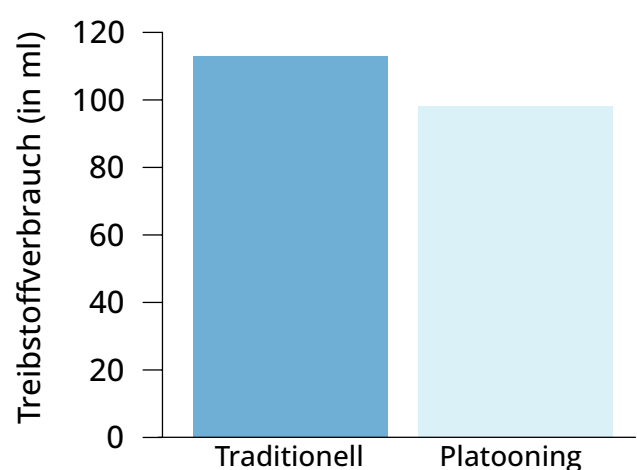


Abbildung 7: Durch Platooning lässt sich in Simulationen der durchschnittliche Treibstoffverbrauch um ca. 15 % verringern. © Tobias Hardes²⁸

Zuverlässige, drahtlose Kommunikation für Platooning

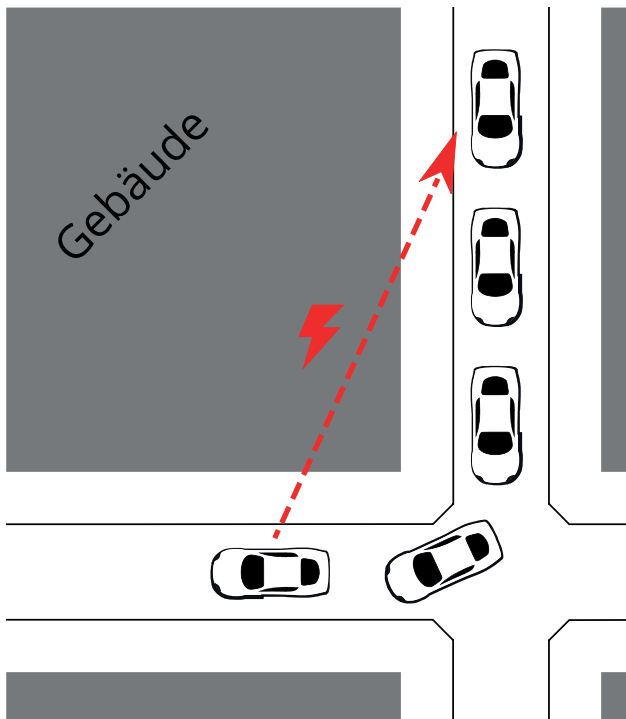


Abbildung 8: Ein Platoon biegt so ab, dass ein Gebäude die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (V2V) innerhalb des Platoons negativ beeinflusst.
© Tobias Hardes²⁴

Da die heutigen Verkehrsprobleme überwiegend im städtischen Umfeld auftreten, kann Platooning insbesondere für solche Umgebungen geeignet sein. Allerdings wurden und werden die Potenziale des Platoonings in der Wissenschaft bisher hauptsächlich für Autobahnen intensiv untersucht. Platooning in Städten wurde in erster Linie unter analytischen Gesichtspunkten betrachtet^{21,22}. Die Ergebnisse dieser Studien legen nahe, dass das koordinierte Fahren im Konvoi beim Überqueren einer Kreuzung sowohl die individuelle Fahrzeit als auch den Durchsatz an einer Kreuzung positiv beeinflussen kann.

Die Forschungsgemeinschaft untersucht verschiedene Ansätze, um eine zuverlässige drahtlose Kommunikation innerhalb eines Platoons zu gewährleisten. Einige Strategien zielen darauf ab, das Timing oder die Frequenz von Signalübertragungen zwischen Fahrzeugen im Platoon zu optimieren, um Kollisionen zu vermeiden^{15,16}. Andere Ansätze kombinieren verschiedene Kommunikationstechnologien, darunter Kombinationen aus Vehicular Visible Light Communication (V-VLC) und Radio Frequency (RF)-basierten Systemen^{17,18,19} sowie Anpassungen der Sendeleistung²⁰ und andere Ansätze. Diese Ansätze haben gemeinsam, dass sie sich ausschließlich auf Freeway Platooning konzentrieren und urbane Gebiete nicht berücksichtigen.

Die meisten dieser Studien berücksichtigen jedoch nicht die Eigenschaften der Kommunikation innerhalb eines Platoons oder betrachten diese nur abstrakt. Verwandte Arbeiten zur drahtlosen Kommunikation in Städten²⁴ haben insbesondere gezeigt, dass das Vorhandensein von (Funk-)Hindernissen wie Gebäuden oder anderen Fahrzeugen die Zuverlässigkeit der (V2X)-Kommunikation erheblich beeinträchtigt. Ein Beispielszenario, in dem Gebäude die drahtlose Kommunikation beeinträchtigen, ist in Abbildung 4 dargestellt. Dies verdeutlicht, dass herkömmliche Ansätze aus dem Autobahn-Platooning nicht unbedingt direkt auf den städtischen Kontext übertragen werden können, da sie solche Hindernisse in der Regel nicht berücksichtigen. Folglich sind neue Ansätze für städtisches Platooning erforderlich.

Formation von Platoons im urbanen Raum

Platooning hat das Potenzial, verschiedene Probleme des heutigen Verkehrs zu lösen. Allerdings werden in der Regel lediglich die Auswirkungen auf die Kontrolle oder Koordination von Platoons untersucht, wenn bereits komplette Platoons auf der Straße unterwegs sind. Die Bildung von Platoons wird häufig nicht oder nur sehr abstrakt betrachtet. Da die Forschungsgemeinschaft vor allem das Platooning auf Autobahnen untersucht und entwickelt, gibt es mehrere Studien zur Bildung von Platoons, insbesondere für dieses Szenario. So orientieren sich verschiedene Studien bei der Reihenfolge der Fahrzeuge am individuellen Streckenziel²⁴ (z.B. Abtrennung der Fahrzeuge am Ende des Platoons), an der räumlichen Nähe²⁵ (schnelle Formation) oder optimiert am Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge²⁶.

Autobahnen sind häufig durch geringe Einschränkungen und einen vergleichsweise hohen Freiheitsgrad gekennzeichnet. Sie bieten in der Regel mehrere Fahrspuren in jeder Richtung und ermöglichen es Fahrzeugen mit hoher Geschwindigkeit zu fahren, ohne an Ampeln oder Kreuzungen anhalten zu müssen. Ein weiterer typischer Aspekt sind die sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmenden. Formationsstrategien für Platoons machen sich diese Merkmale häufig zunutze, so dass diese Strategien in der Regel nicht direkt auf ein städtisches Szenario übertragbar sind, wo diese Freiheitsgrade deutlich eingeschränkter sind. Die spezifischen Charakteristika urbaner Umgebungen

bedingen eine vertiefte Untersuchung der Strategien zur Bildung von Platoons in urbanen Räumen. Dies ist vor allem auf die insgesamt homogenen Fahrzeuggeschwindigkeiten, die begrenzten Überholmöglichkeiten, das Vorhandensein von Ampeln oder die größere Vielfalt potenzieller Routen zurückzuführen. Solche Szenarien können zu komplexeren Formationsstrategien, mehreren Platoon-Formationen und Aufteilungsmanövern sowie einer höheren Anzahl von (kleineren) Platoons führen. Um die Auswirkungen von Platooning in städtischen Umgebungen auf der Grundlage verschiedener Metriken für den Straßenverkehr zu bewerten, muss daher zunächst die Durchführbarkeit der Bildung von Platoons in Städten ermittelt werden.

Ein Ansatz aus der Literatur²⁸ nutzt Rotphasen von Ampeln für die Formation von Platoons im urbanen Raum. Während einer Rotphase nähern sich die Fahrzeuge der Kreuzung und halten an der Haltelinie, bis die Ampel zu Grün wechselt. Während dieser Rotphase entsteht bereits eine größere Anzahl von Fahrzeugen, die nur wenige Meter Abstand zueinander halten. Fahren die Fahrzeuge in die gleiche Richtung, bilden diese ein Platoon. Dazu wird ein Protokoll angewendet, was notwendige Informationen über die Fahrzeuge austauscht und schließlich die globalen Informationen über das neue Platoon an alle Fahrzeuge im Platoon verteilt. Wechselt die Ampelphase auf Grün, kann das so neu geformte Platoon die Kreuzung überqueren.



Kommunikationsstrategien

Die Kommunikation innerhalb eines Platoons ist von grundlegender Bedeutung, um die Stabilität des Platoons zu gewährleisten und somit Kollisionen von Fahrzeugen zu vermeiden. Der Austausch der Informationen erfolgt drahtlos. In Bezug auf die konkrete Umsetzung stehen eine Vielzahl an Technologien zur Verfügung. Seit dem Jahr 2010 existiert ein WLAN-basierter Standard, der als IEEE 802.11p bezeichnet wird. Andere Ansätze basieren auf der Kommunikation mittels sichtbaren Lichts (Vehicular Visible Light Communication, V-VLC) oder auf Mobilfunkansätzen wie LTE und 5G. Ein gemeinsames Merkmal dieser Ansätze ist, dass sie auch ohne eine bereits vorhandene Infrastruktur funktionsfähig sind, das ebenso für LTE- und 5G-Ansätze gilt. Dadurch entsteht ein drahtloses Ad-hoc-Netzwerk, ein dezentrales drahtloses Netzwerk, in dem jeder Kommunikationsteilnehmer direkt mit jedem anderen Teilnehmer kommunizieren kann. Es gibt keine zentralen Router oder Zugangspunkte.

Die Ad-hoc-Kommunikation wird aus mehreren Gründen gegenüber der infrastrukturbasierten Kommunikation präferiert. Sicherheitsrelevante Informationen sind in der Regel auf einen spezifischen geographischen Raum beschränkt und können daher auf lokaler Ebene übermittelt werden. Der Aufbau und die Wartung zusätzlicher Infrastruktur für die V2X-Kommunikation sind mit einem hohen Komplexitäts- und Kostenaufwand verbunden. Die Installation infrastruktureller Ein-

heiten, wie Road Side Units (RSUs), erfordert eine sorgfältige Planung sowie die Gewährleistung einer stabilen Verbindung zum Backbonenetzwerk. In Regionen, die durch Tunnel oder ländliche Gebiete gekennzeichnet sind, ist der Zugang zu Infrastruktur jedoch oft nicht gegeben. Zudem können die Nutzung von Infrastruktur und die damit verbundenen Verzögerungen bei der Datenübertragung eine Herausforderung darstellen, insbesondere für Anwendungen wie das Platooning.

Der IEEE 802.11p-Standard wird nach wie vor häufig in Forschung und Praxis eingesetzt, obwohl der Marktanteil an 5G-basierten Ansätzen weiterhin stark wächst. IEEE 802.11p hat seinen Ursprung im IEEE 802.11-Standard, der gemeinhin als Wi-Fi bezeichnet wird. Während IEEE 802.11 für drahtlose lokale Netzwerke (WLAN) in verschiedenen Umgebungen entwickelt wurde, ist IEEE 802.11p speziell für die drahtlose Kommunikation zwischen Fahrzeugen (Vehicle-to-Vehicle, V2V) und zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure, V2I) konzipiert. Die Kapazität eines drahtlosen Kanals ist begrenzt, sodass bei einer hohen Anzahl an Teilnehmern, die gleichzeitig darauf zugreifen (Interferenz), eine Überlastung des Kanals eintritt. Dies kann zu Störungen, verzögerten Übertragungen oder gar dem Verlust von Informationen führen. Insbesondere in einem stark frequentierten Bereich, wo eine Vielzahl an Fahrzeugen gleichzeitig kommunizieren möchte, kann dies die Effizienz und





Abbildung 9: Kommunikation mittels sichtbaren Lichts kann durch viele externe Faktoren wie Wetter oder Schmutz beeinträchtigt werden. © Tobias Harges

Zuverlässigkeit der Kommunikation erheblich beeinträchtigen. Kritisch sind solche starken Interferenzen, da sie die rechtzeitige Übermittlung sicherheitsrelevanter Informationen verhindern können und somit zu einem Sicherheitsproblem werden.

Eine Möglichkeit zur Bewältigung oder Reduzierung von Interferenz besteht in der Verwendung alternativer Technologien. So sind z. B. die Frequenzbereiche von IEEE 802.11p und sichtbarem Licht (V-VLC) verschieden. Dies impliziert, dass eine simultane Übertragung von Informationen mittels sichtbarem Licht und WLAN ohne gegenseitige Beeinträchtigung möglich ist.

Die Übertragung von Informationen erfolgt bei der Kommunikation mit sichtbarem Licht mittels der Frontscheinwerfer und Rückleuchten. Dazu werden die zu übertragenden Informationen auf das sichtbare Licht modelliert. Die Scheinwerfer schalten sich folglich in kurzen Intervallen ein und wieder aus, um binäre Informationen zu übertragen. Dies resultiert in einem Flackern der Lichter, welches jedoch mit einer derart hohen Frequenz erfolgt, dass es vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen werden kann. Diese Art der Informationsübertragung erweist sich insbesondere für Platooning auf Autobahnen als vorteilhaft. Hier fahren Fahrzeuge oftmals nahezu perfekt ausgerichtet hintereinander her, sodass Sender und Empfänger nahezu perfekte Kommunikationsbedingungen aufweisen. Al-

lerdings können auch hierbei Probleme auftreten. Beispielsweise stellen Sonnenlicht oder Wettereinflüsse (beispielsweise Nebel oder starker Regen) eine Herausforderung dar, da die Lichtintensität des eigentlichen Signals beeinflusst wird.

Die Kommunikation mittels sichtbarem Licht erweist sich für das Platooning in urbanen Umgebungen als nur begrenzt geeignet. Neben den bereits erwähnten Umwelteinflüssen ist zu berücksichtigen, dass Fahrzeuge bei der Fahrt durch eine Kurve nicht mehr nahezu perfekt zueinander ausgerichtet sind.

Mit dem Ziel, die verfügbaren Kanalressourcen optimal zu nutzen, hat die Forschungsgemeinschaft verschiedene Ansätze zur Reduzierung der gesamten Kanallast vorgeschlagen. Ein Ansatz zur Reduzierung der Kanallast besteht in einer Vergrößerung der Intervalle für die Informationsübertragung. Die selteneren Intervalle resultieren jedoch in niedrigeren Aktualisierungsraten, wodurch die Fähigkeit des CACCs, auf Änderungen im Fahrzeugkonvoi zu reagieren, beeinträchtigt wird. Dies kann zu einer Gefährdung der Verkehrssicherheit auf den Straßen führen. Daher sind alternative Ansätze erforderlich, die die Qualität oder Menge der übertragenen Informationen nicht beeinträchtigen.

Die Nutzung von Kanalressourcen kann durch Beamforming erheblich beeinflusst werden, indem die

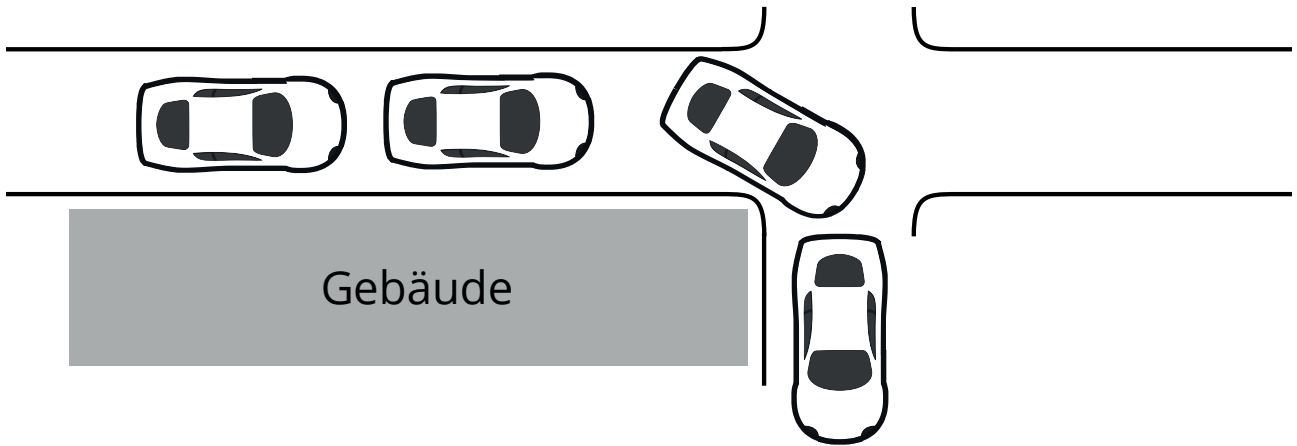


Abbildung 10: Ein Platoon beim Abbiegen. Die Fahrzeuge nicht mehr zueinander ausgerichtet, was die Kommunikation mittels sichtbaren Lichts erschwert. © Tobias Hardes

Richtung der Signalausstrahlung gezielt auf das Ziel ausgerichtet wird. Das Signal wird folglich nicht mehr in alle Richtungen abgestrahlt, sondern konkret in eine Richtung gebündelt. Diese Technologie erweist sich insbesondere für das Platooning als vorteilhaft, da Fahrzeuge in der Regel immer mit den direkt benachbarten Fahrzeugen vorne oder hinten kommunizieren. Gleichzeitig wird die Interferenz für andere Fahrzeuge in der Umgebung minimiert.

Der Einsatz von Beamforming erscheint auf den ersten Blick relativ einfach. Bei näherer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass die Umsetzung in der Praxis mit einigen Herausforderungen verbunden ist. Die Bündelung des Signals erfolgt ähnlich wie bei einem Megafon, wodurch sich die Reichweite des Signals deutlich erhöht. Bei einer hohen Anzahl von Fahrzeugen, die Beamforming nutzen, kann es dennoch zu starker Interferenz auf dem Kanal kommen.

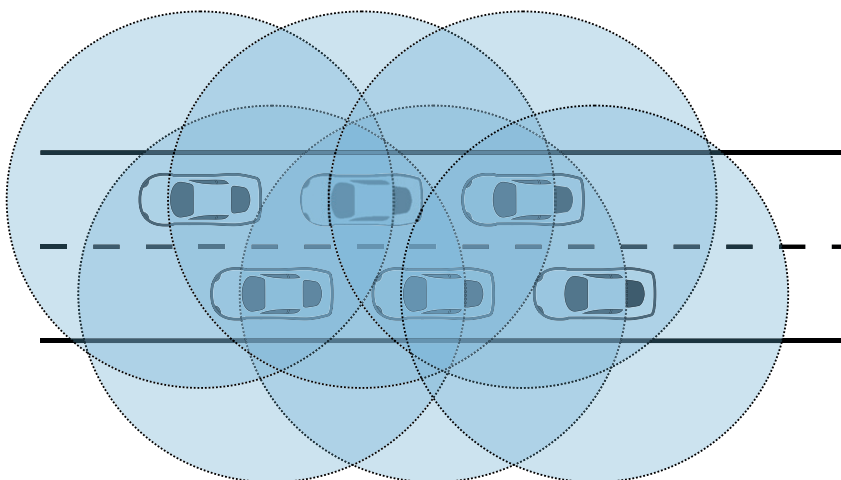


Abbildung 11: Typische Signalabstrahlung in alle Richtungen. Dieses Verhalten kann zu einer Überlastung des Kanals führen. © Tobias Hardes

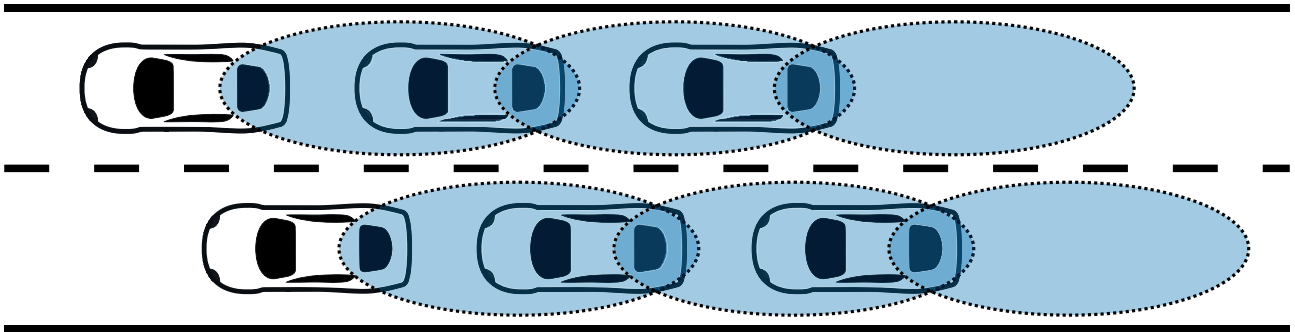


Abbildung 12: Beamforming: Das Signal wird exakt auf das nachfolgende Fahrzeug ausgerichtet. © Tobias Harges

men. Zudem wird der Empfang durch die starken Signale beeinflusst, da weit entfernte Signale potenziell deutlich stärker empfangen werden als Signale aus der näheren Umgebung. Trotz der Vorteile, die durch Beamforming entstehen, kann das Gesamtsystem also darunter leiden.

Auch in diesem Fall kann Abhilfe geschaffen werden. So kann beispielsweise eine Information nicht direkt an ein entferntes Ziel übertragen werden, sondern wird zuvor an einen benachbarten Knoten weitergeleitet, der sich in einer geringeren räumlichen Distanz befindet. Dieses Vorgehen wird bis zur Zieladresse wiederholt. Ein solcher Ansatz wird in der Literatur auch als „Multi-Hop-Kommunikation“ bezeichnet. Der hier beschriebene Ansatz erlaubt zudem eine alternative Positionierung der Antennen, beispielsweise an der Fahrzeugfront und am Fahrzeugheck, da nur der unmittelbare Nachbar erreicht werden muss. Das Fahrzeug selbst schirmt

dabei zusätzlich alle anderen Fahrzeuge von dem Signal ab, sodass auch keine unerwünschten Interferenzen entstehen. Aktuelle Forschungsergebnisse²⁹ zeigen, dass ein solcher Aufbau dazu führt, dass sämtliche Informationen erfolgreich übertragen werden können und zusätzlich die Interferenz für andere Fahrzeuge auf der Straße substantiell reduziert wird. Anders als bei der Kommunikation mittels sichtbarem Licht funktioniert dieser Ansatz sowohl für Platooning auf Autobahnen, als auch für Platooning in Innenstädten.

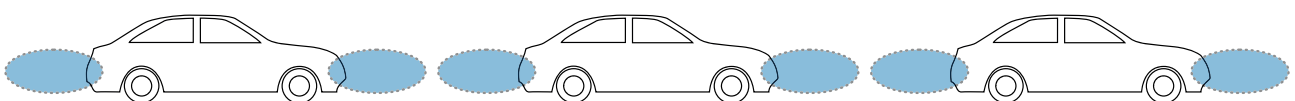


Abbildung 13: Multi-Hop-Ansätze ermöglichen eine andere Positionierung der Antennen, da nur direkt benachbarte Fahrzeuge erreicht werden müssen. So wird zusätzlich Interferenz vermieden. Aktuelle Forschung zeigt, dass durch diesen Ansatz 100 % aller Informationen erfolgreich übertragen werden können. © Tobias Harges

Fazit und Ausblick

Das steigende Verkehrsaufkommen stellt eine wachsende Herausforderung dar, insbesondere in städtischen Gebieten. Die negativen Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit sowie die zunehmenden Probleme mit Unfällen und Staus erfordern dringende Maßnahmen. Moderne Ansätze, wie die Elektrifizierung des Verkehrs und die Förderung alternativer Verkehrsmittel, bieten vielversprechende Lösungen. Das Konzept des Platooning, das kooperative Fahren in Konvois, weist insbesondere ein substantielles Potenzial zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und -effizienz sowie zur Reduktion von Emissionen auf.

Die Forschung belegt, dass Platooning durch die Verringerung des Luftwiderstands und die koordinierte Bewegung von Fahrzeugen eine deutliche Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen bewirken kann. Gleichzeitig ermöglicht die Technologie eine optimierte Straßenauslastung sowie die Vermeidung von Verkehrsschockwellen. Insbesondere auf Autobahnen konnten bereits substantielle Fortschritte erzielt werden, jedoch birgt auch der städtische Raum erhebliches Potenzial. Die bisherige Forschung hat aufgezeigt, dass die Synchronisation der Fahrzeuge an Ampeln sowie die Nutzung der Rotphasen zur Platoon-Bildung vielversprechende Ansätze darstellen.

In urbanen Umgebungen sind jedoch spezifische Herausforderungen zu bewältigen. Aufgrund der dichten Bebauung und der häufigen Kreuzungen sind angepasste Kommunikationsstrategien und Formationsprotokolle für Platoons erforderlich.

In der Zukunft wird die Weiterentwicklung von Technologien sowie deren Anpassung an spezifische Anforderungen städtischer Umgebungen eine entscheidende Rolle spielen. Dies umfasst die Verbesserung der drahtlosen Kommunikation sowie die Entwicklung neuer Protokolle, die auch in komplexen städtischen Szenarien zuverlässig funktionieren. Zudem sollten politische Maßnahmen und städtische Planungen die Implementierung und Förderung solcher Technologien unterstützen.

Die Integration von Platooning in städtische Verkehrssysteme stellt eine vielversprechende Lösung zur Bewältigung der Herausforderungen des wachsenden Verkehrsaufkommens dar. Die kontinuierliche Forschung und Entwicklung in diesem Bereich ist von entscheidender Bedeutung, um die Vorteile der Technologie voll auszuschöpfen und eine nachhaltige, effiziente und sichere Mobilität der Zukunft zu gewährleisten.



Literaturverzeichnis

- 1 F. Van Audenhove, G. Rominger, A. Korn, S. Bettati Aurelia, M. Zintel, A. Smith und S. Haon, Future of mobility 3.0, Arthur D. Little, Whitepaper, 2018.
- 2 J. L. Hopkins and J. McKay, „Investigating “anywhere working” as a mechanism for alleviating traffic congestion in smart cities,” Elsevier Technological Forecasting and Social Change, pp. 258 - 272, doi: 10.1016/j.techfore.2018.07.032, May 2019.
- 3 A. M. Nagy und V. Simon, „Improving traffic prediction using congestion propagation patterns in smart cities,” Elsevier Advanced Engineering Informatics, Bd. 50, pp. 101343, doi: 10.1016/j.aei.2021.101343, 2021.
- 4 T. Harges, Cooperative Mobility in Urban Environments, Dresden: TU Dresden, 2024.
- 5 EC, „Road safety in the European Union,” European Commission, Luxembourg City, 2018.
- 6 Statistisches Bundesamt, „Anzahl der Straßenverkehrsunfälle in Deutschland nach Ortslage von 1991 bis 2022,” Statistisches Bundesamt, 2023.
- 7 S. O.-R. A. V. S. Committee, „Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles,” SAE.
- 8 U. D. f. Transport, „The Highway Code,” Department for Transport, UK Government, 2015.
- 9 N. G. Gupta, R. D. Thakre und Y. A. Suryawanshi, „VANET based prototype vehicles model for vehicle to vehicle communication,” in 2017 International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, India, 2017.
- 10 C. D. o. M. Vehicles, California Driver Handbook 2021, 2021, 06.08.2023.
- 11 M. Segata, A. Piermaria und L. C. Renato, „Modeling Slipstreaming Effects in Vehicle Platoons,” in 12th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2020), Virtual Conference, 2021.
- 12 A. Dávila und M. Nombela, „Sartre - Safe Road Trains for the Environment Reducing Fuel Consumption through Lower Aerodynamic Drag Coefficient,” 2011.
- 13 B. McAuliffe, M. Lammert, X. Lu und S. Shladover, „Influences on Energy Savings of Heavy Trucks Using Cooperative Adaptive Cruise Control,” SAE International, 2018.
- 14 M. Segata, Safe and Efficient Communication Protocols for Platooning Control, Innsbruck: University of Innsbruck, 2016.
- 15 M. Forster, R. Frank, M. Gerla und T. Engel, „A Cooperative Advanced Driver Assistance System to mitigate vehicular traffic shock waves,” in IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Computer Communications, Toronto, 2014.
- 16 T. Harges und C. Sommer, „Dynamic Platoon Formation at Urban Intersections,” in 44th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2019), Poster Session, Osnabrück, 2019.
- 17 J. Ploeg, B. Scheepers, E. van Nunen, N. Wouw und H. Nijmeijer, „Design and Experimental Evaluation of Cooperative Adaptive Cruise Control,” in 14th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2011), Washington, D.C., 2011.
- 18 M. Segata, B. Bloessl, S. Joerer, C. Sommer, M. Gerla, R. Lo Cigno und F. Dressler, „Towards Inter-Vehicle Communication Strategies for Platooning Support,” in 7th IFIP/IEEE International Workshop on Communication Technologies for Vehicles (Nets4Cars 2014-Fall), Saint Petersburg, 2014.
- 19 M. Segata, F. Dressler und R. Lo Cigno, „Jerk Beaconing: A Dynamic Approach to Platooning,” in 7th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2015), Kyoto, 2015.
- 20 M. Schettler, A. Memedi und F. Dressler, „Deeply Integrating Visible Light and Radio Communication for Ultra-High Reliable Platooning,” in 15th IEEE/IFIP Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS 2019), Wengen, 2019.
- 21 M. Segata, R. Lo Cigno, T. Harges, J. Heinovski, M. Schettler, B. Bloessl, C. Sommer und F. Dressler, „Multi-Technology Cooperative Driving: An Analysis Based on PLEXE,” IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC), Bd. 22, pp. 4792 - 4806, doi: 10.1109/TMC.2022.3154643, 2022.

- 22 T. Hardes und C. Sommer, „Towards Heterogeneous Communication Strategies for Urban Platooning at Intersections,“ in 11th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2019), Los Angeles, 2019.
- 23 M. Segata, R. Lo Cigno, H.-M. Tsai und F. Dressler, „On Platooning Control using IEEE 802.11p in Conjunction with Visible Light Communications,“ in 12th IEEE/IFIP Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS 2016), Cortina d’Ampezzo, 2016.
- 24 J. Lioris, R. Pedarsani, F. Y. Tascikaraoglu und P. Varaiya, „Doubling throughput in urban roads by platooning,“ in 14th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems (CTS 2016), Istanbul, 2016.
- 25 L. Lin-heng, G. Jing und L. Wen-quan, „A Separation Strategy for Connected and Automated Vehicles: Utilizing Traffic Light Information for Reducing Idling at Red Lights and Improving Fuel Economy,“ Hindawi Journal of Advanced Transportation, p. doi: 10.1155/2018/5679064, 2018.
- 26 C. Sommer, S. Joerer, M. Segata, O. K. Tnguz, R. Lo Cigno und F. Dressler, „How Shadowing Hurts Vehicular Communications and How Dynamic Beaconing Can Help,“ IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC), Bd. 14, pp. 1411 - 1421, doi: 10.1109/TMC.2014.2362752, Jul 2015.
- 27 R. Hall und C. Chin, „Vehicle sorting for platoon formation: Impacts on highway entry and throughput,“ Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Bd. 13, pp. 405 - 420, doi: 10.1016/j.trc.2004.09.001, 2005.
- 28 M. A. Khan und L. Bölöni, „Convoy driving through ad-hoc coalition formation,“ in 11th IEEE Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS 2005), San Francisco, 2005.
- 29 S. van de Hoef, K. H. Johansson und D. V. Dimarogonas, „Fuel-optimal centralized coordination of truck platooning based on shortest paths,“ in American Control Conference (ACC), American Automatic Control Council, Chicago, 2015.
- 30 T. Hardes und C. Sommer, „Improving Platooning Safety with Full Duplex Relaying and Beamforming,“ in IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2023), Glasgow, 2023.



Zuwendungsgeber:

Gefördert durch:



Förderkennzeichen: 16THB0004A

Laufzeit: 01.09.2022 – 30.06.2025

Projekträger:



VDI / VDE Innovation + Technik GmbH

5 Partner. 5 Standorte. 1 Netzwerk.



diserhub.de