Von Blickkontakt zu Lichtsignalen – Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und Fußgänger*innen im urbanen Raum

Forschung, Anwendungsfälle und Designprinzipien einer sicheren Mensch-Fahrzeug-Interaktion (Stand 2025)

fir an der RWTH Aachen

DiSerHub

Inhalt

1. Einleitung – Wandel durch Automatisierung 3

2. Kommunikation als Schlüssel zur Akzeptanz 4

3. Kommunikationsformen und Designstrategien 6

3.1 Implizite Kommunikation – das Verhalten als Signal 6

3.2 Explizite Kommunikation – visuelle und auditive Schnittstellen 6

3.3 Digitale Kommunikation – Vehicle-to-Pedestrian (V2P) 8

3.4 Multimodale Kommunikation – Redundanz als Prinzip 8

4. Praxisbeispiele und aktuelle Forschungsprojekte 9

4.1 Deutschland 9

4.2 USA 10

4.3 Japan 10

5. Regulierung, offene Forschungsfragen und gesellschaftliche Perspektiven 12

5.1 Rechtliche Rahmenbedingungen 12

5.2 Normung und Standardisierung 12

5.3 Offene Forschungsfragen 13

5.4 Gesellschaftliche Akzeptanz und Ethik 13

6. Fazit 14

Literaturverzeichnis 15

Abbildungsverzeichnis 17

Tabellenverzeichnis 17

Impressum

Autor*in

Franziska Shaker, M.Sc.,
Projektmanager, Dienstleistungsmanagement
FIR e. V. an der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 55
52074 Aachen

Jonas Schatton, M.Sc.,
Projektmanager, Dienstleistungsmanagement
FIR e. V. an der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 55
52074 Aachen

KI-Transparenzhinweis:

Beim Verfassen des Textes zu diesem Heft haben die Autor*innen KI-Tools verwendet, um Verbesserungsvorschläge zu erhalten. Diese wurden von den Autor*innen dann noch überarbeitet. Zudem wurden teilweise KI-basierte Tools zur digitalen Literaturrecherche und Grafikerstellung genutzt.

Satz und Design

FIR e. V. an der RWTH Aachen

Bildnachweise

S. 13: © Svitlana – stock.adobe.com

Lizenzhinweis

Open Access: Dieses Whitepaper wird unter der Creative-Commons-Lizenz „Share alike – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International" (CC BY-SA 4.0) veröffentlicht.

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

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

Stand: 12.2025

Zitiervorschlag:
Shaker, F.; Schatton, J.: Von Blickkontakt zu Lichtsignalen – Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und Fußgänger*innen im urbanen Raum. Forschung, Anwendungsfälle und Designprinzipien einer sicheren Mensch-Fahrzeug-Interaktion. FIR e. V. an der RWTH Aachen, Aachen 2025.

1. Einleitung – Wandel durch Automatisierung

Der Übergang zum autonomen Fahren markiert nicht nur einen technologischen Fortschritt, sondern einen kulturellen Bruch: Die vertraute nonverbale Verständigung im Straßenverkehr – Blicke, Gesten, kleine Bewegungen – verliert ihre Grundlage. Was bleibt, ist die Suche nach neuen Zeichen des Vertrauens. Autonome Fahrzeuge, die ohne menschliche Eingriffe sicher am Straßenverkehr teilnehmen sollen, werden weltweit unter realen Bedingungen getestet. In den USA verkehren Robotaxis von *Waymo* und *Cruise* im urbanen Umfeld von San Francisco[1], in Deutschland werden im Projekt KIRA in Darmstadt automatisierte On-Demand-Shuttles erprobt[2], und in Japan setzt *Toyota* mit dem E-Palette-Konzept vollständig fahrerlose Transportfahrzeuge auf geschlossenen Arealen ein[3].

Mit dieser Entwicklung verschiebt sich die Rolle des Menschen im Straßenverkehr fundamental: Aus den aktiven Fahrer*innen werden passive Passagiere. Dadurch verändern sich vertraute soziale Muster. Kommunikation, die bislang über Blickkontakt, Gestik oder kleine Fahrmanöver zwischen Fahrer*innen und anderen Verkehrsteilnehmer*innen vermittelt wurde, entfällt zunehmend. Diese nonverbalen Routinen waren über Jahrzehnte ein stilles, aber hochwirksames Sicherheitssystem. Sie erlaubten es Fußgänger*innen, in Bruchteilen von Sekunden zu erkennen, ob der*die Fahrer*in eines Fahrzeugs sie wahrgenommen hat und ob das Fahrzeug tatsächlich anhalten wird[4].

Im Kontext autonomer Systeme verschwindet dieser menschliche Kommunikationskanal. Für Fußgänger*innen wird es schwieriger, das Verhalten eines Fahrzeugs einzuschätzen. Unklar bleibt, ob das System reagiert, ob es Vorrang gewährt oder ob es eine Gefahr überhaupt erkannt hat. Fehlende Verständigung führt zu Unsicherheit und schwächt das Vertrauen in die geltenden Verkehrsregeln. Studien zeigen, dass selbst an geregelten Übergängen – etwa Zebrastreifen oder Ampeln – viele Menschen zögern, wenn sie einem Fahrzeug ohne sichtbare*n Fahrer*in gegenüberstehen[5].

Damit wird die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine zu einer neuen Schlüsseldisziplin. Vertrauen in autonome Mobilität entsteht nicht allein aus der objektiven Zuverlässigkeit der Technik, sondern auch aus der subjektiven Erfahrung von Berechenbarkeit und Transparenz. Deshalb beschäftigen sich Forschung und Industrie zunehmend mit sogenannten external Human-Machine-Interfaces (eHMIs), also äußeren Kommunikationssystemen, die den Wegfall der menschlichen Interaktion kompensieren sollen[6]. Sie reichen von visuellen Anzeigen über akustische Hinweise bis hin zu subtilen Fahrbewegungen, die soziale Signale imitieren.

Das vorliegende Whitepaper beschreibt den aktuellen Stand von Forschung und Anwendung in diesem Bereich. Es wird analysiert, wie Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und Fußgänger*innen gestaltet werden kann, welche technischen und psychologischen Mechanismen dabei eine Rolle spielen und welche Konzepte sich derzeit in Entwicklung oder im Praxistest befinden. Der Fokus liegt auf einem internationalen Vergleich zwischen Deutschland, den USA und Japan. Die Analyse wird zeigen, dass die Akzeptanz autonomer Mobilität nicht nur eine Frage der Technologie, sondern vor allem eine Frage des Verstehens ist.

---

[1] s. https://waymo.com/rides/san-francisco (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)
[2] s. https://kira-autonom.de/ (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)
[3] s. Toyota motor corporation 2020
[4] s. Reschke 2021, S. 4-5
[5] s. Joisten et al. 2021, S. 667-670
[6] s. Rouchitsas u. Alm 2019, S. 10

2. Kommunikation als Schlüssel zur Akzeptanz

Die gesellschaftliche Akzeptanz autonomer Fahrzeuge hängt in hohem Maße davon ab, ob sie als verständlich und berechenbar wahrgenommen werden. Vertrauen entsteht nicht aus theoretischer Funktionssicherheit, sondern aus dem Gefühl heraus, dass das Fahrzeug die eigenen Handlungen antizipiert und angemessen reagiert. Das Sicherheitsgefühl von Fußgänger*innen wird daher weniger durch technische Leistungsdaten bestimmt als durch die kommunikative Qualität der Begegnung.

Aktuelle Untersuchungen bestätigen diesen Zusammenhang. Habibovic et al.[7] zeigen, dass Menschen autonome Fahrzeuge als sicherer empfinden, wenn diese eine erkennbare „Intention" äußern, also sichtbar oder hörbar machen, dass sie die Situation verstanden haben. Zanguzhinova et al.[8] konnten in einer Virtual-Reality-Studie nachweisen, dass klare Lichtsignale die Unsicherheit von Fußgänger*innen beim Überqueren einer Straße signifikant verringern und ihre Reaktionszeit verkürzen.

Auch empirische Arbeiten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt[9] zeigen, dass das Vertrauen in automatisierte Systeme nicht vom technischen Wissen der Testpersonen abhängt, sondern davon, wie eindeutig die Intention des Fahrzeugs erkennbar ist. Menschen reagieren auf Fahrzeuge, die klar kommunizieren, deutlich entspannter und vorhersehbarer. Besonders ältere Personen oder Kinder profitieren von expliziten visuellen Hinweisen, während technikaffine Personen zusätzlich das Fahrverhalten in ihre Einschätzung einbeziehen. Vertrauen ist somit kein statischer Zustand, sondern ein sozial-erfahrungsbasierter Prozess, der sich durch wiederholte, positive Interaktion stabilisiert[10].

Beobachtungen aus den USA bestätigen diese Zusammenhänge im Realverkehr. In San Francisco werden Waymo-Fahrzeuge von Fußgänger*innen als „höflicher" und „vorhersehbarer" beschrieben, wenn sie an Zebrastreifen sichtbar verlangsamen oder durch ein sanftes „Vortasten" signalisieren, dass sie warten. Dieses Verhalten wird als kommunikatives Zeichen interpretiert, ähnlich wie ein menschlicher Fahrer, der kurz bremst, um Blickkontakt zu suchen[11]. Solche sozial-kinematischen Signale zeigen, dass Kommunikation auch ohne Display oder Textanzeige stattfinden kann. Sie müssen jedoch kulturell korrekt interpretiert werden: Ein Verhalten, das in den USA als Rücksichtnahme verstanden wird, kann in Europa oder Asien ganz anders gedeutet werden.

Fehlende Kommunikation führt dagegen nachweislich zu Unsicherheit. Studien wie die von Lau et al. zeigen, dass viele Fußgänger*innen aktiv auf ein Zeichen des Fahrzeugs warten, bevor sie eine Straße betreten. Bleibt dieses aus, wird der Übergang verzögert oder ganz abgebrochen. Dies verdeutlicht, dass technologische Perfektion ohne soziale Lesbarkeit unzureichend ist. Die wichtigste Voraussetzung für Akzeptanz ist daher eine Kommunikation, die die menschliche Wahrnehmung ernst nimmt und an bestehende Interaktionsmuster anknüpft.[12]

Der Forschungsstand der letzten Jahre belegt, dass diese Herausforderung sowohl psychologische als auch technische Dimensionen hat. Virtual-Reality-Studien wie die von Zanguzhinova et al.[13] zeigen, dass redundante Signalgebung, also die Kombination von Bremsbewegung, Lichtsignal und gegebenenfalls akustischer Rückmeldung, das Vertrauen

[7] s. Habibovic et al. 2018, S. 12
[8] s. Zanguzhinova et al. 2023, S. 6–9
[9] s. Bolles et al. 2022, S. 19
[10] s. Hoppe et al. 2024, S. 795–797
[11] s. Fowler 2024
[12] s. Lau et al. 2022a, S. 7f.
[13] s. Zanguzhinova et al. 2023, S. 6–9

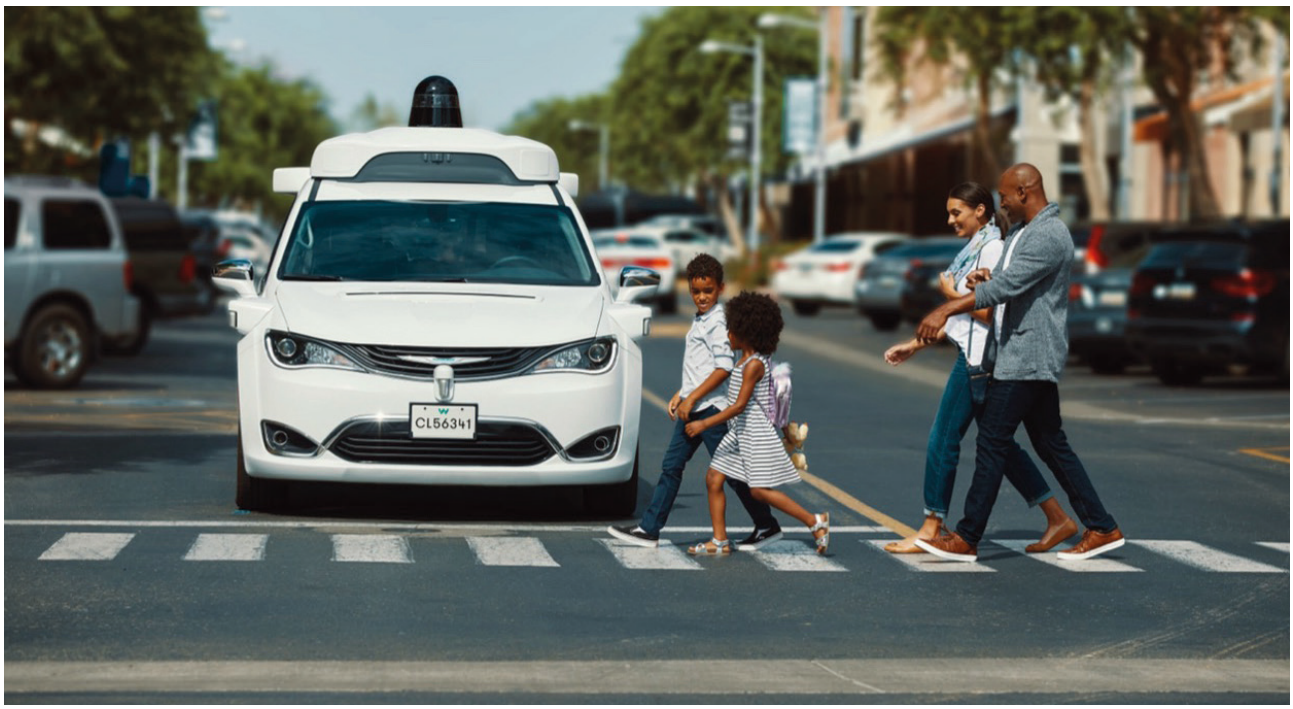

Bild 1: „Waymo's fully autonomous legacy Chrysler Pacifica Hybrid minivan at a crosswalk": Waymo mit Famile auf dem Zebrastreifen (Quelle: Waymo)[14]

signifikant erhöht. Neue Ansätze aus der KI-Forschung[15] nutzen Blickrichtung, Körperhaltung und Bewegungsgeschwindigkeit von Fußgänger*innen, um deren Absicht vorherzusagen und die Kommunikation adaptiv anzupassen.

Zwischen den Ländern zeigen sich deutliche Unterschiede: In Deutschland liegt der Schwerpunkt auf kontrollierten Testfeldern wie dem Projekt KIRA oder dem DigiNet-PS in Berlin, wo rechtliche Rahmenbedingungen und Standardisierung im Vordergrund stehen[16,17]. In den USA wird dagegen stärker auf praktische Erprobung im offenen Stadtverkehr gesetzt. San Francisco fungiert als Reallabor, in dem Interaktionsdaten in großem Maßstab gesammelt und ausgewertet werden[18]. Japan verfolgt wiederum einen stärker nutzerzentrierten Ansatz, bei dem inklusive Kommunikation, etwa akustische Signale für ältere oder sehbehinderte Personen, im Mittelpunkt steht[19].

Diese unterschiedlichen Herangehensweisen verdeutlichen, dass Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und Fußgänger*innen stets im kulturellen und regulatorischen Kontext betrachtet werden muss. Eine universelle, für alle Gesellschaften verständliche eHMI-Sprache existiert bislang nicht. Dennoch lässt sich feststellen: Überall dort, wo Kommunikation als integraler Bestandteil der Fahrzeugintelligenz verstanden wird, wächst auch das gesellschaftliche Vertrauen in autonome Mobilität.

Die bisherigen Erkenntnisse führen zu einem klaren Zwischenfazit: Kommunikation ist keine nachträgliche Ergänzung technischer Systeme, sondern deren soziale Voraussetzung. Autonomes Fahren wird nur dann breite Akzeptanz finden, wenn Maschinen nicht nur sicher, sondern auch verständlich handeln – und wenn Menschen das Gefühl haben, dass sie weiterhin Teil eines gegenseitigen Dialogs im Straßenverkehr bleiben.

---

[14] s. „Legacy Vehicles", No. 1: https://waymo.com/media-resources/
[15] s. Zhang et al. 203, S. 3538
[16] s. https://kira-autonom.de/ (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)
[17] s. https://diginet-ps.de/en/home/ (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)
[18] s. https://waymo.com/rides/san-francisco (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)
[19] s. Miyaki 2023, S. 167

3. Kommunikationsformen und Designstrategien

Die Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und Fußgänger*innen lässt sich in mehrere komplementäre Ansätze unterteilen, die jeweils unterschiedliche sensorische, technische und soziale Ebenen adressieren. Während frühe Forschung vor allem zwischen impliziter und expliziter Kommunikation unterschied, zeigt sich heute ein erweitertes Verständnis, das auch digitale und multimodale Komponenten einbezieht. Der Kern dieser Entwicklung liegt in der Einsicht, dass kein einzelner Kanal allein ausreichend ist, um Sicherheit und Vertrauen herzustellen. Erst das Zusammenspiel verschiedener Ausdrucksformen ermöglicht eine robuste Verständigung im komplexen Straßenverkehr.

3.1 Implizite Kommunikation – das Verhalten als Signal

Implizite Kommunikation basiert auf der Bewegung des Fahrzeugs selbst. Geschwindigkeit, Beschleunigung, Spurwahl oder Halteposition werden zu Trägern sozialer Information. Wenn ein autonomes Fahrzeug vor einem Zebrastreifen sanft abbremst und seine Front leicht senkt, interpretieren Fußgänger*innen dieses Verhalten meist als Anhalteintention. Bleibt das Fahrzeug dagegen in gleichbleibender Geschwindigkeit, entsteht Unsicherheit, auch wenn es technisch korrekt reagiert.[20]

Studien zur sogenannten sozialen Kinematik belegen, dass selbst minimale Variationen in der Fahrzeugdynamik, etwa die Rate der Verzögerung oder der Abstand zum Bordstein, die Wahrnehmung durch Fußgänger*innen entscheidend beeinflussen[21]. In Simulationen zeigte sich, dass ein langsames, stetiges Abbremsen als „kooperativ“, ein abruptes Stoppen hingegen als „defensiv, aber unsicher“ empfunden wird. *Waymo* etwa nutzt in San Francisco eine Fahrstrategie, die auf vorausschauendes Bremsen und sanftes Anrollen setzt, um menschliches Verhalten zu imitieren und Missverständnisse zu vermeiden[22].

Der Vorteil impliziter Kommunikation liegt in ihrer Natürlichkeit: Sie greift auf bekannte Verhaltensmuster zurück und funktioniert ohne zusätzliche Anzeigeelemente. Ihr Nachteil ist jedoch die Mehrdeutigkeit. Ein leichtes Abbremsen kann je nach Kontext als Anhalten oder als Beschleunigungsvorbereitung verstanden werden. Daher gilt: Implizite Kommunikation ist unverzichtbar, aber sie bedarf der Ergänzung durch explizite, eindeutige Signale.

3.2 Explizite Kommunikation – visuelle und auditive Schnittstellen

Explizite Kommunikation nutzt gezielte Anzeigen, Lichtsignale oder akustische Hinweise, um die Absichten des Fahrzeugs aktiv zu vermitteln. Solche Systeme werden unter dem Begriff external Human-Machine-Interface (eHMI) zusammengefasst. Ihr Ziel ist es, die Unsicherheit zu verringern, die entsteht, wenn kein menschlicher Fahrer sichtbar ist.[23]

Aktuelle Konzepte reichen von Lichtbändern und Symbolprojektionen über Displays bis hin zu projizierten Zebrastreifen. Audi verfolgt mit der Digital-Matrix-LED-Technologie ein Verfahren, bei dem Millionen mikrooptischer Spiegel dynamische Muster auf die Fahrbahn projizieren können[24]. Dadurch lässt sich beispielsweise anzeigen, dass das Fahrzeug gestoppt hat oder Fußgänger*innen Vorrang gewährt.

---

[20] s. Lau et al. 2022b, S. 2
[21] s. Ruppe 2025
[22] s. Izquierdo et al. 2023, S. 4
[23] s. Lau et al. 2022b, S. 2–3
[24] s. Audi AG 2024

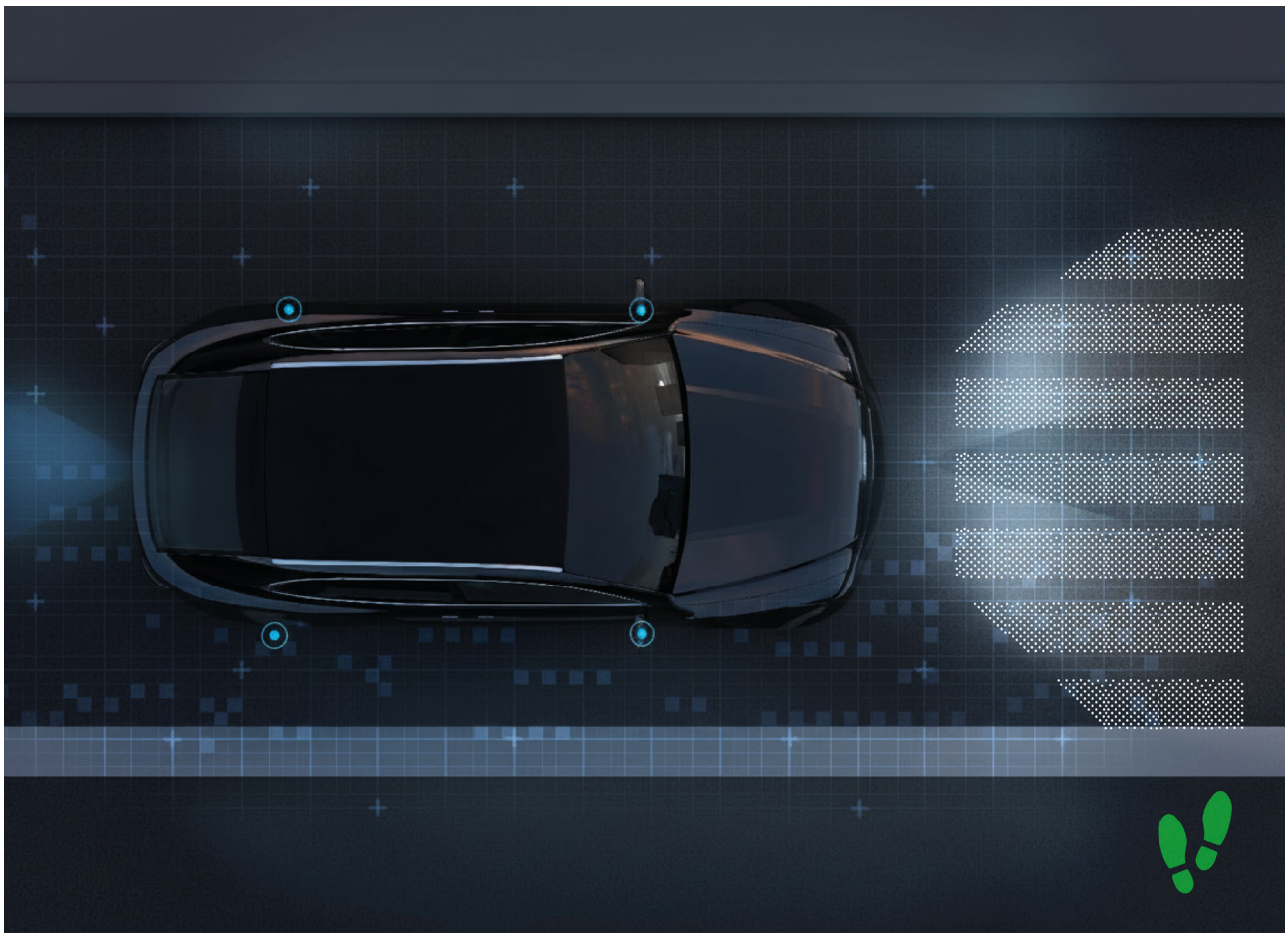

Bild 2: Fahrzeug-Projektion eines Zebrastreifens (Quelle: Generiert mit Perplexity Pro und modifiziert mit Adobe Illustrator)

Mercedes-Benz experimentiert mit einer 360-Grad-Lichtkommunikation, die den Betriebsmodus (autonom oder manuell) signalisiert und zugleich die geplante Fahrtrichtung andeutet[25].

Denkbar sind auch Hilfslinien für andere Verkehrsteilnehmer*innen, womit diese erkennen, dass das herannahende Auto sie erkannt hat. *Mercedes* kann sich wie bei der Studie des Zukunftsfahrzeugs F 015[26] sogar vorstellen, den Kühlergrill zu einer Kommunikationsfläche nach außen werden zu lassen oder einen Zebrastreifen als Querungshilfe auf die Straße zu strahlen. Mit einer Million Lichtpunkten im Scheinwerfer lassen sich 100 Meter vor dem Fahrzeug schärfer denn je Kleinstelemente mit einer Größe von 2,5 x 4 Zentimeter darstellen. Noch müssen die Behörden dafür jedoch ihre Genehmigungen erteilen.

Wenn ein Auto variabel Warnmeldungen auf die Straße projiziert, ist dies schließlich ebenso für andere Verkehrsteilnehmer*innen sichtbar. Das Projizieren von Lichtsignalen auf die Straße, wie zum Beispiel Zebrastreifen durch stehende oder fahrende Fahrzeuge, wird derzeit nicht gestattet, da es zu Verwirrung bei Fußgänger*innen und anderen autonomen Fahrzeugen führen könnte.

Wissenschaftlich zeigt sich, dass explizite Kommunikation dann am wirksamsten ist, wenn sie einfach, redundant und kontextsensibel erfolgt. Die Normungsarbeit in der ISO-Gruppe TC 204/WG 14 zielt deshalb darauf ab, standardisierte Farb- und Symbolsysteme für eHMIs zu definieren Parallel dazu arbeitet die *Society of Automotive Engineers* (SAE J3134) an Richtlinien für Lichtsignale und Textanzeigen, die weltweit kompatibel sein sollen.

[25] s. https://group.mercedes-benz.com/innovation/case/autonomous/future-insight-2.html (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)

[26] s. https://www.mercedes-benz.com.au/passengercars/campaigns/mercedes-benz-f-015.html?srsltid=AfmBOopnrcCkMn7FVkFwlBQIU9zaR_HzpWYhHswyxCGozvJCryrkwjUw (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)

3.3 Digitale Kommunikation – Vehicle-to-Pedestrian (V2P)

Neben visuellen und auditiven Mitteln gewinnt die digitale Kommunikation zunehmend an Bedeutung. Sie basiert auf drahtloser Datenübertragung zwischen Fahrzeugen, Infrastruktur und mobilen Endgeräten. Systeme wie *Vehicle-to-Pedestrian* (V2P) oder *Cellular Vehicle-to-Everything* (C-V2X) ermöglichen es, potenziell gefährliche Situationen frühzeitig zu erkennen, noch bevor Sichtkontakt besteht[27].

In europäischen Testfeldern wie der Autobahn A9 in Bayern oder im Berliner Projekt ‚DigiNet-PS' wird untersucht, wie V2P-Signale über 5G- oder ITS-G5-Netze an Smartphones oder Wearables gesendet werden können[28]. So kann beispielsweise eine Warnung ausgegeben werden, wenn ein*e Fußgänger*in sich unachtsam einer Fahrbahn nähert. Auch das Fahrzeug erhält umgekehrt Informationen über die Position von Personen – eine Technik, die insbesondere für den nächtlichen oder verdeckten Straßenverkehr relevant ist[29].

Der Vorteil dieser digitalen Ebene liegt in der Reichweite und Reaktionsschnelligkeit. Sie erlaubt Kommunikation über Sichtgrenzen hinweg. Zugleich entstehen neue Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf Datenschutz, Energieverbrauch und die Abhängigkeit von Netzabdeckung. In Deutschland und der EU wird derzeit diskutiert, inwieweit solche Systeme standardisiert und verpflichtend werden sollen. Die SAE-Norm J3161 sowie die ETSI-Spezifikation ITS-G5 bilden hier die technischen Grundlagen.

3.4 Multimodale Kommunikation – Redundanz als Prinzip

Am wirkungsvollsten erweist sich laut Dou et al. die Kombination verschiedener Kommunikationskanäle. Ein Fahrzeug, das gleichzeitig abbremst (implizit), ein grünes Lichtband aktiviert (visuell) und über Lautsprecher eine kurze Bestätigung ausgibt („Bitte gehen Sie"), erzeugt ein deutlich höheres Maß an Vertrauen als ein System, das nur einen Kanal nutzt. Solche multimodalen Ansätze reduzieren Fehlinterpretationen, da sie dieselbe Botschaft über mehrere Sinne vermitteln.[30]

Erste Untersuchungen ergaben bereits, dass die Reaktionszeit von Fußgänger*innen in multimodalen Szenarien signifikant verkürzt werden konnten. Die redundante Signalgebung wirkt zudem inklusiv, da sie auch Menschen mit Sinnesbeeinträchtigungen einbezieht. Entsprechend wird in aktuellen Forschungsarbeiten für ein integratives Kommunikationsdesign plädiert, das sensorische Vielfalt nicht als Redundanzverlust, sondern als Sicherheitsgewinn versteht.[31]

Ein Vergleich der Kommunikationsformen sowie etwaige Vorteile und Risiken dieser sind in Tabelle 1 zu sehen.

[27] s. Adnan Yusuf et al. 2024, S. 2
[28] s. https://diginet-ps.de/en/home/ (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)
[29] s. Nguyen et al. 2020, S. 84
[30] s. Dou et al. 2021, S. 3
[31] s. Alhawiti et al. 2024, S. 10

Signaltyp	Beispiele	Vorteile	Risiken	Technische Reife	Geeignete Szenarien
Implizit (kinematisch)	sanftes Bremsen, Halteposition, Spurwahl	natürlich, keine Zusatzhardware notwendig, immer aktiv	mehrdeutig, kulturabhängige Deutung	hoch ●●●	Zebrastreifen, Kreuzung
Explizit (eHMI visuell)	LED-Bänder, Symbole, Projektionen, Text	eindeutig, sichtbar, vertrauensfördernd	Blendung/Wetter, Standardisierungsbedarf	mittel – hoch ●●◐	Ungeregelte Übergänge, Nacht, Baustellen
Explizit (auditiv)	Hinweistöne, Sprachansagen	ohne Sichtkontakt nutzbar, inklusiv	Lärmbelästigung, Sprache/Kultur	mittel ●●○	Haltestellen, Parkhäuser, Events
Digital (V2P/C-V2X)	Smartphone/Smarwatch, IST-G5/5G	über Sichtlinie hinaus, frühzeitige Warnung	Datenschutz, Netzabhängigkeit	mittel ●●○	verdeckte Situationen, Nacht, komplexe Knoten
Multimodal (redundant)	Bremsen + Licht + Ton	höchste Verständlichkeit, robust	Synchronisierungs-bedarf, UX-Komplexität	mittel – hoch ●●◐	Innenstadt, Schulzonen

Tabelle 1: Vergleich der Kommunikationsformen (eigene Darstellung)

4. Praxisbeispiele und aktuelle Forschungsprojekte

Die theoretischen Modelle der Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und Fußgänger*innen werden inzwischen in zahlreichen Pilotprojekten unter realen Bedingungen erprobt. Ein internationaler Vergleich zeigt, dass Deutschland, die USA und Japan dabei unterschiedliche, aber komplementäre Schwerpunkte setzen.

4.1 Deutschland

In Deutschland liegt der Fokus auf systematischer Erprobung unter kontrollierten Bedingungen. Im Projekt KIRA in Darmstadt wird der Betrieb hochautomatisierter On-Demand-Shuttles im städtischen Raum untersucht[32]. Im Mittelpunkt steht die Frage, wie Passant*innen auf verschiedene Kommunikationsformen reagieren und wie Vertrauen im alltäglichen Mischverkehr entsteht. Erste Ergebnisse zeigen, dass visuelle Lichtsignale und klar erkennbare Fahrzeugreaktionen das Sicherheitsgefühl deutlich erhöhen.

Parallel dazu wird im Projekt ‚DigiNet-PS' in Berlin eine vernetzte Testumgebung aufgebaut, in der Fahrzeuge über 5G-basierte V2P-Schnittstellen mit Infrastruktur und Smartphones interagieren[33]. Beide Projekte liefern wertvolle Daten für die nationale Standardisierung von eHMI-Designs.

[32] s. https://kira-autonom.de/ (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)
[33] s. https://diginet-ps.de/en/home/ (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)

Bild 3: KIRA setzt den NIO ES8 mit dem eingebauten autonomen Fahrsystem von Mobileye ein (© RMV/DB, Quelle: KIRA, https://kira-autonom.de (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025))

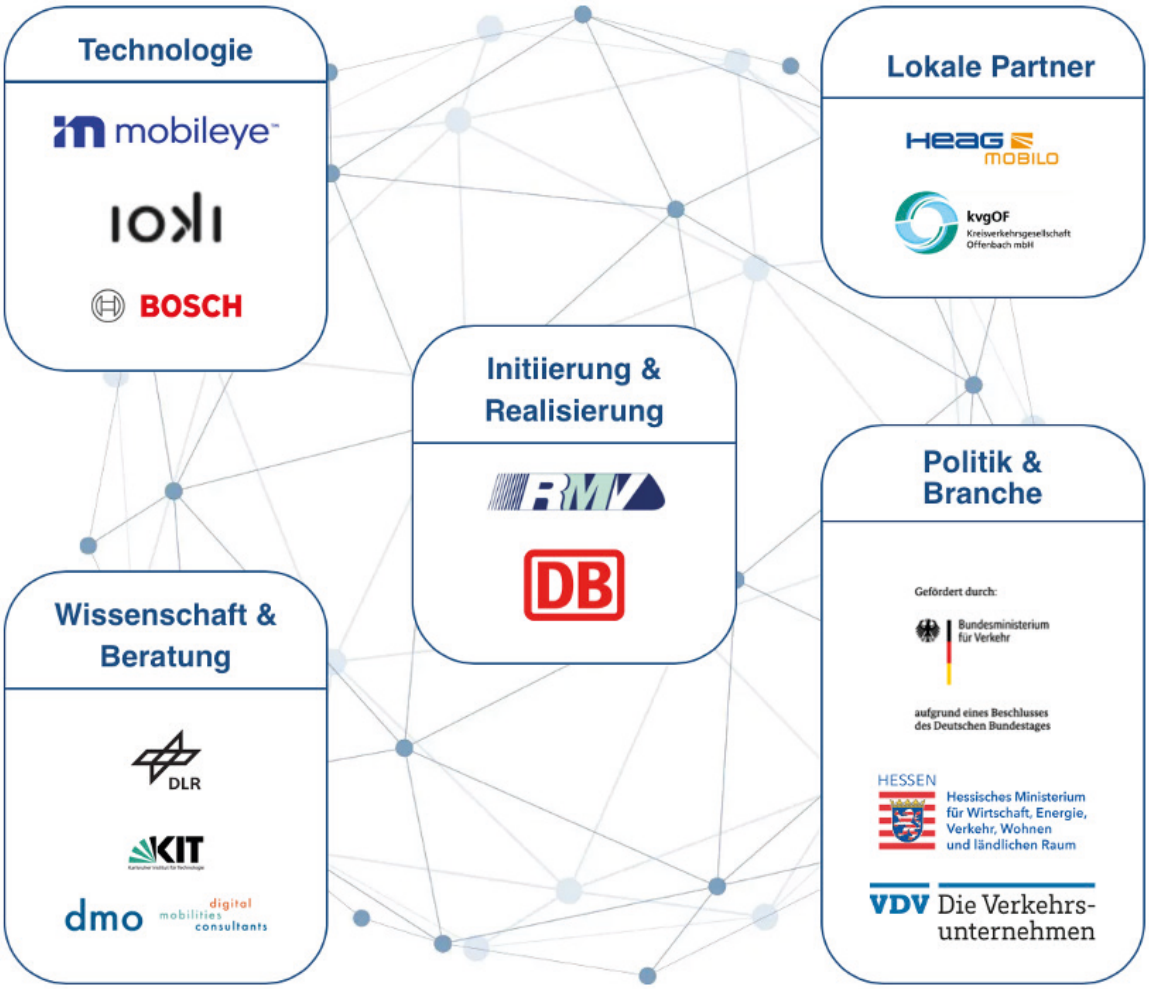

Abbildung 1: Partnernetzwerk des Forschungs- und Entwicklungsprojekts KIRA (© RMV/DB, Quelle: KIRA, https://kira-autonom.de ; „Ein starkes Partnernetzwerk…" (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025))

4.2 USA

In den USA hat sich San Francisco als internationales Reallabor etabliert. *Waymo* betreibt dort eine vollständig autonome Robotaxi-Flotte, die täglich mit tausenden Fußgänger*innen interagiert. Nach Angaben des Unternehmens[34] wurden in über zehn Millionen gefahrenen autonomen Kilometern keine signifikanten Erhöhungen von Fußgängerunfällen festgestellt. Beobachtungen zeigen, dass *Waymos* Fahrzeuge ihr Verhalten zunehmend an menschliche Erwartungen anpassen: Sie rollen sanft an, halten bei Unsicherheit länger an und signalisieren durch kleine Bewegungen, dass sie warten. Diese „menschlich wirkende" Fahrweise steigert das Vertrauen, ohne dass zusätzliche Anzeigen nötig sind.[35,36]

Ein konträres Beispiel bietet *Cruise*, ebenfalls in San Francisco aktiv. Nach Zwischenfällen im Jahr 2023, bei denen ein Fußgänger durch ein autonomes Fahrzeug verletzt wurde, wurde das Kommunikations- und Sicherheitsverhalten softwareseitig angepasst. Seither reagiert das System konservativer, stoppt früher und wartet länger, bevor es an Kreuzungen anfährt. Die öffentliche Wahrnehmung zeigt, dass transparente Kommunikation, auch über Fehler und Verbesserungen, entscheidend für die Akzeptanz ist.[37]

4.3 Japan

In Japan verfolgt *Toyota* mit dem Projekt ‚e-Palette' einen stärker sozial-inklusiven Ansatz. Die Fahrzeuge kommunizieren zusätzlich über akustische Signale und Sprachansagen, um auch seh- oder hörgeschädigten

[34] s. Waymo 2021
[35] s. https://waymo.com/rides/san-francisco (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)
[36] s. Kusano et al. 2024, S. 8f.
[37] s. Weber 2023

Bild 4: „The 5th-generation Waymo Driver on the all-electric Jaguar I-PACE". Waymo One Robotaxis fahren seit 2023 ohne Sicherheitsfahrer bereits in 5 Städten in USA. Waymo-Fahrzeuge operieren auf SAE-Level 4 — allerdings nur innerhalb fest definierter Einsatzgebiete (geofenced areas) (Quelle: WAYMO)[38]

Personen Orientierung zu geben und damit eine universelle Barrierefreiheit zu erreichen.[39]

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und Fußgänger*innen in allen drei Regionen einen unterschiedlichen Reifegrad aufweist: Deutschland konzentriert sich auf Standardisierung und Forschung, die USA auf großskalierte Anwendung im Realverkehr und Japan auf inklusive Gestaltung. Gemeinsam ist allen Ansätzen die Erkenntnis, dass technologische Leistungsfähigkeit allein nicht genügt. Erst wenn Maschinen sozial verständlich handeln, entsteht das Vertrauen, das für ihre Integration in den öffentlichen Raum notwendig ist.

[38] s. „Our Fleet", No. 3: https://waymo.com/media-resources/

[39] s. Toyota Motor Corporation 2025

[40] s. https://media.toyota.fr/une-version-speciale--tokyo-2020--de-le-palette-toyota-pour-offrir-aux-athletes-une-solution-de-mobilite-autonome/https://media.toyota.fr/une-version-speciale--tokyo-2020--de-le-palette-toyota-pour-offrir-aux-athletes-une-solution-de-mobilite-autonome/ (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)

Bild 5: Toyotas automatisiert fahrendes Mehrzweckfahrzeug e-Palette, das 2027 mit einem automatisierten Fahrsystem der Stufe 4 auf den Markt kommen soll. Das Elektro-Shuttle bietet es Platz für bis zu 16 Passagiere. (Quelle: Toyota)[40]

5. Regulierung, offene Forschungsfragen und gesellschaftliche Perspektiven

Die technische Machbarkeit autonomer Fahrzeuge ist heute weitgehend nachgewiesen, doch ihre gesellschaftliche Integration hängt entscheidend von der Regulierung und der Kommunikationsgestaltung ab. Während Sensorik, Software und Rechenleistung stetig verbessert werden, bleibt die rechtliche und soziale Dimension der Interaktion zwischen Mensch und Maschine ein offenes Feld.

5.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Deutschland hat mit dem Gesetz zum autonomen Fahren (2022)[41] als eines der ersten Länder weltweit einen verbindlichen Rechtsrahmen für den Betrieb von Fahrzeugen der Automatisierungsstufe 4 geschaffen. Es regelt u. a. die Zulassung sogenannter „autonomer Betriebsbereiche“ sowie die Pflicht zur Datenaufzeichnung. Allerdings enthält das Gesetz keine konkreten Vorgaben zur Kommunikation zwischen Fahrzeug und Fußgänger*innen. Hier sind lediglich „Sicherheitsvorkehrungen nach Stand der Technik“ gefordert, ohne deren genaue Ausgestaltung zu definieren. Die Verantwortung für die Interpretation dieser Formulierung liegt bei den Herstellern und Prüforganisationen.[42]

In den USA verfolgt die *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) eine stärker marktorientierte Strategie: Hersteller dürfen autonome Systeme auf öffentlichen Straßen testen, sofern sie lokale Sicherheitsanforderungen erfüllen. Seit 2023 untersucht die NHTSA allerdings gezielt die Interaktion von Robotaxis mit Fußgänger*innen, nachdem mehrere Zwischenfälle, insbesondere mit *Cruise*-Fahrzeugen, zu öffentlichen Debatten geführt haben. Erste Leitlinien zu „Pedestrian Safety in Automated Driving Systems“ empfehlen explizit redundante Kommunikationsformen, die sich an Wahrnehmungsfähigkeiten und kulturelle Kontexte anpassen lassen[43].

Japan integriert die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und schwächeren Verkehrsteilnehmer*innen im Rahmen des nationalen Mobilitätsplans 2030 in bestehende Verkehrsstandards[44]. Die japanische Gesetzgebung betrachtet eHMI und akustische Signale als Bestandteil der Sicherheitsausrüstung, was dem Land eine Vorreiterrolle bei der Barrierefreiheit verschafft hat. *Toyota*, *Honda* und *Nissan* testen derzeit Prototypen mit standardisierten Farbcodes, die voraussichtlich in den kommenden Jahren in nationale Vorschriften überführt werden sollen[45].

5.2 Normung und Standardisierung

Parallel zur Gesetzgebung schreitet die technische Standardisierung voran: Die Arbeitsgruppe WG 14 des *ISO Technical Committee 204* arbeitet an einem internationalen Leitfaden für visuelle eHMI-Elemente. Vorgesehen ist eine Vereinheitlichung von Farbcodes, Blinkmustern und Anzeigeformen, um globale Verständlichkeit zu fördern. Ergänzend entwickelt die SAE (*Society of Automotive Engineers*) die Normen J3134 und J3161, die Lichtkommunikation bzw. V2P-Übertragung definieren sollen.

---

[41] s. https://www.gesetze-im-internet.de/afgbv/BJNR098610022.html (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)
[42] s. BMV 2021
[43] s. Covington & Burling LLP 2024
[44] s. Asagami 2023
[45] s. Kessels 2021

Die europäische ETSI-Spezifikation ITS-G5[46] beschreibt die drahtlose Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur. Sie bildet die Grundlage für Pilotprojekte in Deutschland und Frankreich, bei denen Fußgänger*innen über Mobilgeräte oder Intelligente Ampeln in den Kommunikationsfluss eingebunden werden. Diese Initiativen zeigen, dass Standardisierung nicht nur technische Kompatibilität, sondern auch soziale Konsistenz erfordert: Signale müssen unabhängig von Alter, kulturellem Hintergrund oder technischer Erfahrung intuitiv verständlich bleiben.

5.3 Offene Forschungsfragen

Trotz erheblicher Fortschritte bleiben wesentliche Fragen unbeantwortet: Erstens ist unklar, wie viele Signale sinnvoll sind, bevor Redundanz zur Verwirrung führt. Eine Überkommunikation kann paradoxerweise Unsicherheit verstärken, wenn Licht, Ton und Bewegung nicht perfekt synchronisiert sind.

Zweitens stellt sich die Frage nach der kulturellen Codierung von Farben, Symbolen und Bewegungsmustern. Weltweit einheitliche Signale stoßen hier an anthropologische Grenzen.

Die dritte Herausforderung betrifft die Einbindung von Künstlicher Intelligenz in die Kommunikation. Systeme, die Gestik, Blickrichtung oder Gruppenverhalten von Fußgänger*innen erkennen, könnten deren Intentionen antizipieren und darauf reagieren. Doch diese „prädiktive Interaktion“ wirft neue ethische und datenschutzrechtliche Fragen auf: Soll ein Fahrzeug Entscheidungen über Menschen auf Basis probabilistischer Modelle treffen dürfen? Wie werden Fehleinschätzungen bewertet?

Viertens bleibt die Evaluierung realer Wirkung ein methodisches Problem. Laborexperimente und VR-Studien liefern wertvolle Daten, doch sie spiegeln nur bedingt die Komplexität urbaner Umgebungen wider. Daher fordern Forschende eine stärkere Integration von umfangreichen Feldversuchen, ähnlich wie sie bereits aktuell in den USA durchgeführt werden[47]. Schließlich muss geklärt werden, wie Kommunikationsdesigns zertifiziert werden können. Während Bremswege oder Sensorgenauigkeiten normiert sind, fehlt bislang ein Prüfverfahren für Verständlichkeit und Vertrauen.

5.4 Gesellschaftliche Akzeptanz und Ethik

Kommunikation autonomer Fahrzeuge ist mehr als eine technische Schnittstelle. Sie ist eine soziale Verhandlung darüber, wie Maschinen Teil öffentlicher Räume werden. Die Einführung autonomer Systeme verändert implizite Normen, etwa wer wem Vortritt lässt oder wie Verantwortung verteilt wird. Wenn Fahrzeuge „höflich“ oder „vorausschauend“ agieren, schreiben sie diese sozialen Regeln algorithmisch fest. Daraus erwachsen ethische Fragen nach Transparenz, Kontrolle und Vertrauen.

Akzeptanz ist dabei kein statischer Zustand, sondern ein kollektiver Lernprozess. Studien aus Deutschland und Japan zeigen, dass wiederholte positive Begegnungen mit autonomen Fahrzeugen die anfängliche Skepsis deutlich verringern[48,49]. Vertrauen entsteht nicht durch Informationskampagnen, sondern durch Erfahrung im Alltag. Deshalb fordern Expert*innen eine frühe Einbindung der Öffentlichkeit in Pilotprojekte, klare Kommunikation über Systemgrenzen und eine kontinuierliche gesellschaftliche Begleitforschung. Nur wenn Menschen erleben, dass die Maschine sich sozial nachvollziehbar verhält, wird aus Akzeptanz langfristige Zustimmung[50].

---

[46] s. ETSI EN 303 797 V2.1.1
[47] s. https://waymo.com/rides/san-francisco (Link zuletzt geprüft: 24.11.2025)
[48] s. Lau et al. 2022b, S. 7–12
[49] s. Lau et al. 2024, S. 6f.
[50] s. Habibovic et al. 2018, S. 15

6. Fazit

Die Entwicklung autonomer Fahrzeuge markiert den Beginn einer neuen Phase der Mobilität, in der Maschinen nicht nur technische, sondern auch soziale Akteure sind. Ihre Integration in den Straßenverkehr erfordert ein Umdenken: Sicherheit hängt nicht allein von Sensoren, Algorithmen und Bremswegen ab, sondern ebenso von Verständlichkeit und Vertrauen.

Kommunikation ist das Bindeglied zwischen technischer Autonomie und menschlicher Wahrnehmung. Sie entscheidet, ob ein Fahrzeug als berechenbar, höflich und sicher erlebt wird oder als unnahbar und potenziell gefährlich. Implizite Signale wie Bremsverhalten oder Spurwahl bilden die Basis, explizite Mittel wie Lichtanzeigen und Projektionen schaffen Klarheit, und digitale Kanäle wie V2P erweitern den Kommunikationsraum über die Sichtlinie hinaus. Am wirksamsten sind Systeme, die diese Ebenen kombinieren und konsistent gestalten.

Deutschland spielt mit seinen Testfeldern und normativen Initiativen eine zentrale Rolle in der Entwicklung standardisierter eHMI-Systeme, während die USA durch umfangreiche Realdaten wertvolle empirische Erkenntnisse liefern und Japan mit inklusiven Konzepten neue Maßstäbe bei Barrierefreiheit setzt.

Gemeinsam zeigen diese Ansätze: Technische Intelligenz allein genügt nicht. Sie muss durch soziale Lesbarkeit ergänzt werden.

Für die kommenden Jahre zeichnen sich drei notwendige Entwicklungsrichtungen ab:

Erstens wird die Standardisierung von Kommunikationssymbolen und Farbkonventionen auf internationaler Ebene vorangetrieben. Zweitens entstehen KI-basierte Interaktionsmodelle, die das Verhalten von Fußgänger*innen vorhersagen und adaptiv auf deren Bedürfnisse reagieren. Drittens rückt die Integration in Smart-City-Infrastrukturen in den Fokus, sodass autonome Fahrzeuge mit Ampeln, Sensoren und mobilen Endgeräten kooperieren können.

Langfristig wird die Straße zu einem geteilten, kommunikativen Raum, in dem Mensch und Maschine aufeinander reagieren, ohne sich gegenseitig zu überfordern. Die Herausforderung besteht darin, diese neue Form der Verständigung so zu gestalten, dass sie intuitiv, inklusiv und international verständlich bleibt. Nur dann kann das autonome Fahrzeug zu einem vertrauenswürdigen Partner im öffentlichen Raum werden – sichtbar, berechenbar und sozial kompatibel.

Bild 6: Sicherheit durch Sichtbarkeit: Ein autonomes Fahrzeug signalisiert Fußgängern durch projizierte Lichtsymbole aktiv den Vorrang und schafft so Vertrauen im geteilten Straßenraum. (Quelle: Generiert mit Perplexity Pro und modifiziert mit Adobe Photoshop (Beta))

Literaturverzeichnis

Adnan Yusuf, S.; Khan, A.; Souissi, R.: Vehicle-to-everything (V2X) in the autonomous vehicles domain – A technical review of communication, sensor, and AI technologies for road user safety. In: Transportation Research Interdisciplinary Perspectives 23 (2024), Art.-nr.: 100980, 23 S. DOI: 10.1016/j.trip.2023.100980

Alhawiti, A.; Kwigizile, V.; Oh, J.-S.; Asher, Z. D.; Hakimi, O.; Aljohani, S.; Ayantayo, S.: The Effectiveness of eHMI Displays on Pedestrian-Autonomous Vehicle Interaction in Mixed-Traffic Environments. In: Sensors 24 (2024) 15, 23 S. DOI: 10.3390/s24155018

Asagami, A.: Level-4 Self-Driving Cars to Hit Japanese Streets for the First Time. Japan forward online, 31.03.2023. https://japan-forward.com/level-4-self-driving-cars-to-hit-japanese-streets-for-the-first-time/ (Link zuletzt geprüft: 22.10.2025)

Audi AG (Hrsg.): Lighting technology. Audi Mediacenter online, 23.10.2024. https://www.audi-mediacenter.com/en/the-new-audi-a5-models-modern-sportiness-meets-premium-proportions-16261/lighting-technology-16279#:~:text=The%20communication%20light%20of%20the,is%20in%20a%20safe%20state. (Link zuletzt geprüft: 21.10.2025)

Bolles, A.; Hahn, A.; Hoppe, I.: Trustworthy Autonomous Systems. Systems Engineering Challenges for Trustworthiness. DLR Institute of Systems Engineering for Future Mobility, Oldenburg, 27.09.2022, 39 Folien. https://a.storyblok.com/f/74249/x/a5f4eb6868/s3-1-2022-07-09_bolles_hoppe_hahn_trustworthy_autonomous_systems_final.pdf (Link zuletzt geprüft: 17.11.2025)

Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.): Gesetz zum autonomen Fahren tritt in Kraft. BMV online, 27.07.2021. https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/gesetz-zum-autonomen-fahren.html (Link zuletzt geprüft: 22.10.2025).

Covington & Burling LLP (Hrsg.): NHTSA Announces Pedestrian Safety. Focused Updates to the New Car Assessment Program. Covington online, 09.12.2024. https://www.cov.com/en/news-and-insights/insights/2024/12/nhtsa-announces-pedestrian-safety-focused-updates-to-the-new-car-assessment-program (Link zuletzt geprüft: 22.10.2025)Dou, J.; Chen, S.; Tang, Z.; Xu, C.; Xue, C.: Evaluation of Multimodal External Human–Machine Interface for Driverless Vehicles in Virtual Reality. In: Symmetry 13 (2021) 4, Art.-nr. 687, 17 S. DOI: 10.3390/sym13040687

ETSI EN 303 797 V2.1.1 (2024-02): Intelligent Transport Systems (ITS); ITS-G5 Access layer in the 5 GHz frequency band; Release 2. Februar 2024. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/303700_303799/303797/02.01.01_60/en_303797v020101p.pdf (Link zuletzt geprüft: 17.11.2025)

Fowler, G. A.: On roads teeming with robotaxis, crossing the street can be harrowing. Washington Post online, 30.12.2024. https://www.washingtonpost.com/technology/2024/12/30/waymo-pedestrians-robotaxi-crosswalks/&ved=2ahUKEwi9_ubEl_mQAxXHAfsDHX0sLuwQFnoECAwQAQ&usg=AOvVaw05WU0CX_ZkU9fPhLU-1pUj7 (Link zuletzt geprüft: 17.11.2025)

Habibovic, A.; Lundgren, V. M.; Andersson, J.; Klingegård, M.; Lagström, T.; Sirkka, A.; Fagerlönn, J.; Edgren, C.; Fredriksson, R.; Krupenia, S.; Saluäär, D.; Larsson, P.: Communicating Intent of Automated Vehicles to Pedestrians. In: Frontiers in psychology 9 (2018), Art.-nr. 1336, 17 S. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.01336

Hoppe, I.; Hagemann, W.; Stierand, I.; Hahn, A.; Bolles, A.: Challenges for trustworthy autonomous vehicles: Let us learn from life. In: Systems Engineering 27 (2024) 4, S. 789–800. DOI: 10.1002/sys.21744

Izquierdo, R.; Alonso, J.; Benderius, O.; Sotelo, M. Á.; Llorca, D. F.: Pedestrian and Passenger Interaction with Autonomous Vehicles: Field Study in a Crosswalk Scenario. In: International Journal of Human–Computer Interaction 41(2025)15, S. 9587–9605. DOI: 10.1080/10447318.2024.2426856

Joisten, P.; Niessen, P.; Abendroth, B.: Pedestrians' Attitudes Towards Automated Vehicles: A Qualitative Study Based on Interviews in Germany. In: Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021); Vol. III: Sector Based Ergonomics. Hrsg.: N. L. Black; W. P. Neumann; I. Noy. Lecture Notes in Networks and Systems; Bd. 221. Springer, Cham [u. a.] 2021, S. 664–673. DOI: 10.1007/978-3-030-74608-7_81

Kessels, C.: The eHMI: How Autonomous Cars Will Communicate With the Outside World. The Turn Signal Blog online, Mai 2021. https://www.theturnsignalblog.com/the-ehmi-how-autonomous-cars-will-communicate-with-the-outside-world/ (Link zuletzt geprüft: 22.10.2025)

Kusano, K. D.; Scanlon, J. M.; Chen, Y.-H.; McMurry, T. L.; Chen, R.; Gode, T.; Victor, T.: Comparison of Waymo rider-only crash data to human benchmarks at 7.1 million miles. In: Traffic Injury Prevention 25(2024)Issue sup1: Peer-Reviewed Journal for the 68th Annual Scientific Conference of the Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM), S66-S77. DOI: 10.1080/15389588.2024.2380786

Lau, M.; Jipp, M.; Oehl, M.: One Solution Fits All? Evaluating Different Communication Strategies of a Light-based External Human-Machine Interface for Differently Sized Automated Vehicles from a Pedestrian's Perspective. In: Accident; analysis and prevention 171 (2022), Art.-nr. 106641, 12 S. DOI: 10.1016/j.aap.2022.106641 [=2022a]

Lau, M.; Jipp, M.; Oehl, M.: Toward a Holistic Communication Approach to an Automated Vehicle's Communication With Pedestrians: Combining Vehicle Kinematics With External Human-Machine Interfaces for Differently Sized Automated Vehicles. In: Frontiers in psychology 13 (2022), Art.-n. 882394; 15 S. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.882394 [=2022b]

Lau, M.; Lee, J.; Kitazaki, S.; Daimon, T.; Oehl, M.: Investigating Implicit and Explicit Communication of Highly Automated Vehicles in Japan: How do Light-band eHMIs affect Pedestrians' Willingness to Cross, Trust and Perceived Safety? In: Accident; analysis and prevention 207 (2024), Art.-nr. 107719; 10 S. DOI: 10.1016/j.aap.2024.107719

Miyaki, Y.: Research and Evaluations for Fostering Public Acceptance. In: SIP 2nd Phase : Automated Driving for Universal Services. Final Results Report (2018–2022). Hrsg.: New Energy and Industrial Technology Development, 06.03.2023, S. 166–172. https://www.jstage.jst.go.jp/article/sipadusreport/2022/1/2022_165/_article/-char/ja/

Nguyen, Q.-H.; Morold, M.; David, K.; Dressler, F.: Car-to-Pedestrian communication with MEC-support for adaptive safety of Vulnerable Road Users. In: Computer Communications 150 (2020), S. 83–93. DOI: 10.1016/j.comcom.2019.10.033

Reschke, J.: Fahrerintentionserkennung zur lichtbasierten Kommunikation mit Fußgängern. Karlsruhe, Techn. Univ., Diss., 2021. DOI: 10.5445/IR/1000140184

Rouchitsas, A.; Alm, H.: External Human-Machine Interfaces for Autonomous Vehicle-to-Pedestrian Communication: A Review of Empirical Work. In: Frontiers in psychology 10 (2019), Art.-nr. 2757; 12 S. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02757

Ruppe, S.: Safe interaction between pedestrians and automated vehicles. DLR researches new communication strategies. DLR online, 31.01.2025. https://www.dlr.de/en/ts/latest/news/2025/safe-interaction-between-pedestrians-and-automated-vehicles-dlr-researches-new-communication-strategies (Link zuletzt geprüft: 22.10.2025).

Toyota Motor Corporation (Hrsg.): [Pressemitteilung]Toyota Shows e-Palette Geared Towards Practical MaaS Applications. Toyota online, 22.12.2020. https://global.toyota/en/newsroom/corporate/34527341.html (Link zuletzt geprüft: 21.10.2025)

Toyota Motor Corporation (Hrsg.): [Pressemitteilung]Toyota Launches Next-Generation New Mobility e-Palette. Providing Mobility Experience through Multi-Use Features toward Achieving a Mobility Society. Toyota online, 15.09.2025. https://global.toyota/en/newsroom/corporate/43308425.html (Link zuletzt geprüft: 22.10.2025).

Waymo (Hrsg.): Waymo Safety Report. Februar 2021. https://downloads.ctfassets.net/sv23gofxcuiz/4gZ7ZUxd4SRj1D1W6z3rpR/2ea16814cdb42f9e8eb34cae4f30b35d/2021-03-waymo-safety-report.pdf (Link zuletzt geprüft: 17.11.2025)

Weber, A.: After pedestrian crashes, the feds want to take a closer look at Cruise's self-driving cars. KUT Community Radio/KUT News online, 19.10.2023. https://www.kut.org/transportation/2023-10-19/cruise-autonomous-vehicles-hit-pedestrians-federal-investigation (Link zuletzt geprüft: 17.11.2025)

Zhang, Z.; Tian, R.; Ding, Z.: TrEP: Transformer-Based Evidential Prediction for Pedestrian Intention with Uncertainty. In: Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence 37 (2023) 3, S. 3534–3542. DOI: 10.1609/aaai.v37i3.25463

Zhanguzhinova, S.; Makó, E.; Borsos, A.; Sándor, Á. P.; Koren, C.: Communication between Autonomous Vehicles and Pedestrians: An Experimental Study Using Virtual Reality. In: Sensors 23 (2023) 3, Art.-nr. 1049; 10 S. DOI: 10.3390/s23031049

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: „Waymo's fully autonomous legacy Chrysler Pacifica Hybrid minivan at a crosswalk": Waymo mit Famile auf dem Zebrastreifen....5

Bild 2: Fahrzeug-Projektion eines Zebrastreifens....7

Bild 3: KIRA setzt den NIO ES8 mit dem eingebauten autonomen Fahrsystem von Mobileye ein....9

Abbildung 1: Partnernetzwerk des Forschungs- und Entwicklungsprojekts KIRA....10

Bild 4: „The 5th-generation Waymo Driver on the all-electric Jaguar I-PACE". Waymo One Robotaxis fahren seit 2023 ohne Sicherheitsfahrer bereits in 5 Städten in USA. Waymo-Fahrzeuge operieren auf SAE-Level 4 — allerdings nur innerhalb fest definierter Einsatzgebiete (geofenced areas)....11

Bild 5: Toyotas automatisiert fahrendes Mehrzweckfahrzeug e-Palette, das 2027 mit einem automatisierten Fahrsystem der Stufe 4 auf den Markt kommen soll. Das Elektro-Shuttle bietet es Platz für bis zu 16 Passagiere....11

Bild 6: Sicherheit durch Sichtbarkeit: Ein autonomes Fahrzeug signalisiert Fußgängern durch projizierte Lichtsymbole aktiv den Vorrang und schafft so Vertrauen im geteilten Straßenraum....14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Kommunikationsformen....8

Zuwendungsgeber:

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Förderkennzeichen: 16THB0004A
Laufzeit: 01.09.2022 – 31.12.2025
Projektträger:

VDI | VDE | IT

VDI / VDE Innovation + Technik GmbH

5 Partner. 5 Standorte. 1 Netzwerk.

fir an der RWTH Aachen

Fraunhofer AUTOMOBIL

ifa Institut für Automobilwirtschaft

SICP Software Innovation Campus Paderborn
HEINZ NIXDORF INSTITUT
UNIVERSITÄT PADERBORN

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

TUCed AN-INSTITUT FÜR TRANSFER UND WEITERBILDUNG

diserhub.de