

Ausgabe 11/2025

Projekt C2CBridge: Au-
tonome Brücke zwischen
Stadt und Land

➤ Seite 6

Projekt C2CBridge: Inter-
view mit Prof. Gauterin
und Prof. Vortisch

➤ Seite 11

KI-basierte Sensoraus-
wertung

➤ Seite 9

Titelthema

➔ Autonome Mobilität: Im Wettbewerb der Konzepte



KAMO.MAGAZIN

KARLSRUHE MOBILITY
HIGH PERFORMANCE CENTER / PROFILREGION

Was fehlt zur flächende-
ckenden Automatisie-
rung im ÖPNV?

➤ Seite 32

Synthetische Daten, die
die Realität ersetzen
können

➤ Seite 22

**Mobilitätsforschung
kompakt und verständlich:**

Karlsruher Aktivitäten laufender
Forschungsprojekte und aktuelle
wissenschaftliche Ergebnisse

CoCar NextGen: Weg-
weisende Forschungs-
plattform für das auto-
matisierte und
vernetzte Fahren

➤ Seite 18

ISSN (Print) 2941-7511
ISSN (Online) 2941-7554



Impressum

KAMO.Magazin

kamo.one/magazin

Redaktion

Dr. Miriam Ruf
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7
76327 Pfinztal

Jens Ziehn
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Fraunhoferstr. 1
76131 Karlsruhe

Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7
76327 Pfinztal

Telefon +49 721 4640-0
Fax +49 721 4640-111
info@ict.fraunhofer.de
www.ict.fraunhofer.de

Erscheinungsort

Karlsruhe

Redaktionsschluss

09/2025

DOI der Ausgabe (Digital Object Identifier)

doi:10.5445/IR/1000186533

ISSN (Print) 2941-7511

ISSN (Online) 2941-7554

© Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich, sofern nicht durch die Lizenz CC BY 4.0 gedeckt.

Editorial



Titelthema: Autonome Mobilität – Im Wettbewerb der Konzepte

Vollautomatisiertes oder autonomes Fahren auf der Straße verspricht, die Mobilität von morgen sicherer, nahtloser und für mehr Menschen besser verfügbar zu machen. Während die ersten Konzepte über hundert Jahre alt sind, und in den 1980er Jahren bereits einmal ein Durchbruch erwartet wurde, zeichnet sich erst seit den 2010er Jahren ab, dass die Vision greifbar auf dem Weg in die Wirklichkeit ist.

Um fahrerloses Fahren zu einer Mobilitätsform zu entwickeln, die in unterschiedlichsten Anwendungsfällen die Breite der Bedarfe abdeckt, sind jedoch noch Herausforderungen zu lösen, die von der Absicherung von KI und Sensorik über menschenrechtliche Fahrzeugentwicklung bis zur flächendeckenden Inbetriebnahme autonomer Shuttle-Services reichen. Einigen dieser Herausforderungen und den damit verbundenen Forschungsarbeiten widmen wir diese Ausgabe.

→ KITopen & DOI

Das KAMO-Magazin erscheint jetzt ebenfalls als Open-Access-Publikation von KITopen, als Gesamtausgabe sowie als Einzelbeiträge mit referenzierbarer DOI-Nummer (Digital Object Identifier). Alle aktuellen und früheren Beiträge finden Sie damit auf KITopen (bibliothek.kit.edu/kitopen.php) ebenso wie in internationalen Publikationslisten übersichtlich, digital, und über dauerhafte Links weitergebar.



KITopen

Das zentrale Repository des KIT

Meilensteine dieser Entwicklung stammen aus Karlsruhe und Baden-Württemberg: 2013 fuhr erstmals eine Mercedes Benz S-Klasse in einem Projekt der Daimler AG mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und dem FZI Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe 100 Kilometer von Mannheim nach Pforzheim, über unterschiedlichste Straßentypen, ohne menschliche Eingriffe zu benötigen. Etwa zehn Jahre später gelingt Daimler als erstem Fahrzeughersteller die Zulassung eines automatisierten Fahrbetriebs nach SAE/VDA-Stufe 3: Der »Drive Pilot« in der S-Klasse und dem EQS kann das Fahrzeug unter anderem auf deutschen Autobahnen und US-amerikanischen Freeways fahren, ohne dass der Mensch ständig überwachen und potenziell eingreifen muss. 2022 ist die sogenannte AFGVB (Autonome Fahrzeuge-Genehmigungs- und Betriebs-Verordnung) in Kraft getreten, die den automatisierten Betrieb in festen Betriebsbereichen ermöglicht.

In der Rubrik **[PROJEKT.EINBLICK]** ab Seite 6 beleuchten wir aus unterschiedlichen Perspektiven das Großprojekt Country-to-City-Bridge (C2CBridge), in dem automatisierte Ruftaxis entwickelt werden, die künftig den ländlichen Raum an den urbanen Nahverkehr anschließen sollen. In **[FORSCHUNG.KOMPAKT]** geben wir ab Seite 18 Einblicke in Technik und Anwendungen des neuen Versuchsfahrzeugs CoCar NextGen des FZI, und betrachten außerdem, wie Simulationen und virtuelle Welten helfen können, KI für Mobilitätsanwendungen besser zu verstehen und sicherer zu gestalten. Und in der neuen Rubrik **[ZAHLEN.DATEN]** stellen wir ab Seite 32 die Ergebnisse einer aktuellen Studie vor, die die Schritte zum flächendeckenden Betrieb automatisierter Shuttlebusse in Deutschland erhebt.

Wir wünschen wegweisende Einblicke! ■

Mit den besten Grüßen aus Karlsruhe

Matthias Vولات & Jens Ziehn

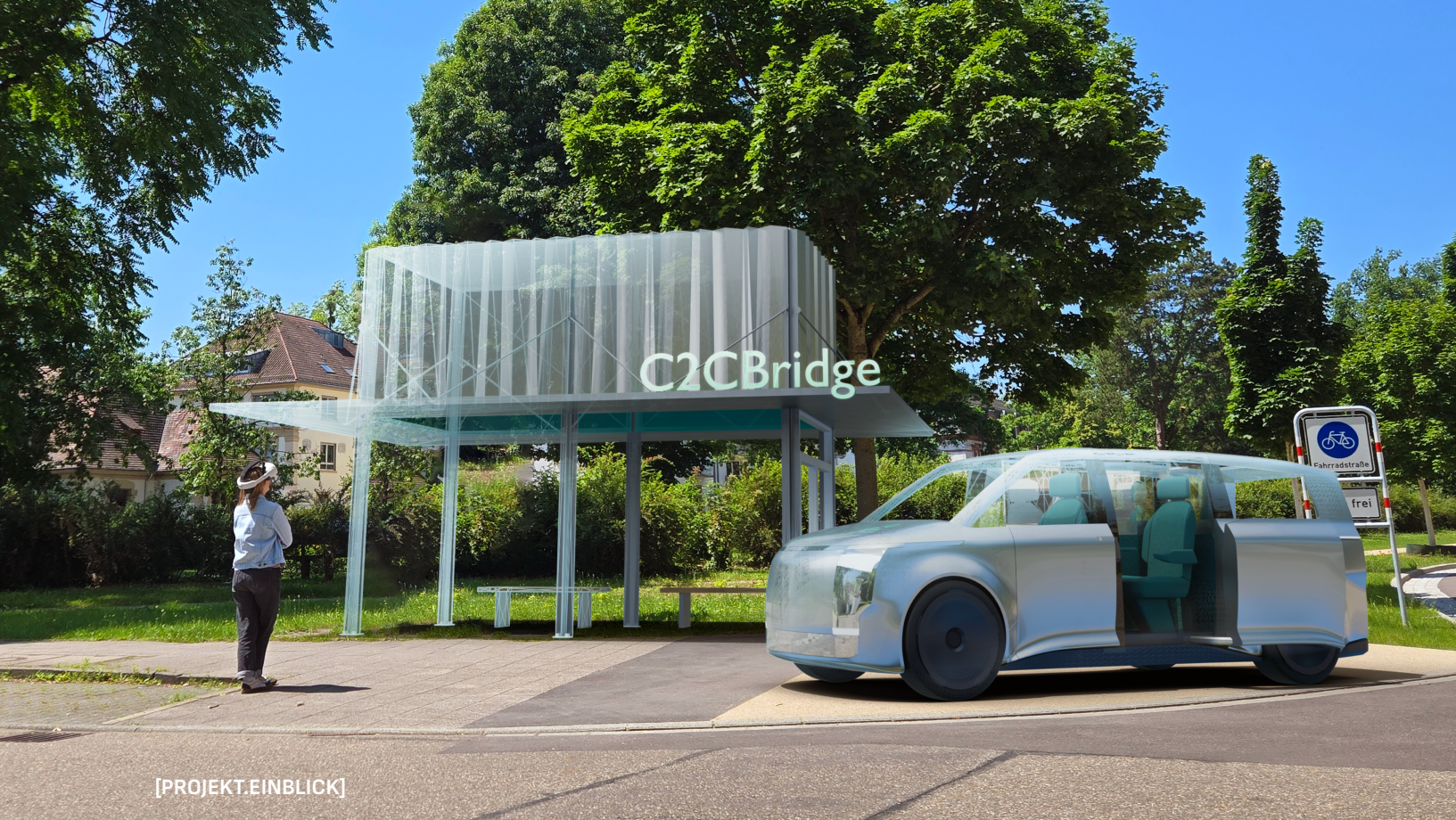




DEUTSCHLAND 2520 - JETZT ABER WIRKLICH.

→ In dieser Ausgabe (doi:10.5445/IR/1000186533)

[KAMO.INFO] – In eigener Sache	3
Editorial	4
[PROJEKT.EINBLICK] – Das Projekt Country-to-City Bridge	5
Autonome Brücke zwischen Stadt und Land: Das Projekt C2CBridge	6
Mit Wärmekameras und KI zur individuellen Wohlfühltemperatur im Fahrzeug	8
Warum brauchen wir C2CBridge? Ein Gespräch mit Prof. Gauterin und Prof. Vortisch	11
[FORSCHUNG.KOMPAKT] – Wissenschaftlich geprüfte Forschungsergebnisse greifbar aufbereitet	17
CoCar NextGen: Forschungsplattform für automatisiertes und vernetztes Fahren	18
Synthetische Daten, die die Realität ersetzen können	22
[DATEN.FAKTEN] – Mobilitätstrends in aktuellen Zahlen	31
Was fehlt zur flächendeckenden Automatisierung im ÖPNV?	32



[PROJEKT.EINBLICK]

Autonome Brücke zwischen Stadt und Land: Das Projekt C2CBridge



Das Forschungsprojekt »Country-to-City Bridge«, kurz C2CBridge, entwickelt ein nutzerzentriertes ÖPNV-Angebot, das zwischen Land und Stadt attraktive Alternativen zum eigenen Pkw bietet. Kernbestandteile sind autonome, platooningfähige Ruf-Sammeltaxis in Pkw-Größe sowie intelligente Umsteigehubs. Durch immersive Visualisierungen werden Bürgerinnen und Bürger sowie Stakeholder in den Entwicklungsprozess einbezogen. Ziel ist es, nachhaltige und effiziente Mobilitätslösungen zu schaffen, die den Verkehr reduzieren und die Lebensqualität sowohl in Städten als auch auf dem Land verbessern.

→ Kontakt

Dr. Matthias Vollat

Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Tel: +49 721 608-45366

matthias.vollat@kit.edu

kamo.one/c2c-bridge/



Der Personenverkehr zwischen Stadt und Land stellt eine große Herausforderung dar. Während städtische Gebiete von effizienten öffentlichen Verkehrssystemen profitieren, ist auf dem Land das eigene Auto oft alternativlos. Dies führt zu starkem Verkehr privater Pkw in die Städte, was dort erheblichen Raum beansprucht. Diese Situation verdeutlicht den Bedarf an innovativen Lösungen für eine nachhaltigere und effizientere Mobilität zwischen Stadt und Land.

Das Forschungsprojekt C2CBridge untersucht innovative Möglichkeiten für ein individualisiertes ÖPNV-Angebot, das attraktive Alternativen zum eigenen Pkw bietet. Durch Digitalisierung, Vernetzung und Automatisierung sollen autonome Ruftaxis in Pkw-Größe entwickelt werden, die Platz für bis zu vier Personen sowie zusätzlichen Raum für Rollstühle, Kinderwagen oder Gepäck bieten. Diese Fahrzeuge operieren flexibel im ländlichen Raum und können beim Übergang in die Stadt elektronisch zu effizienten Verbänden (sogenannten »Platoons«) gekoppelt werden. Nach maximal einem Umstieg in angenehm gestalteten Mobilitätshubs bringen sie die Nutzenden entweder direkt zur Zieladresse oder ermöglichen den Wechsel zu anderen Verkehrsmitteln des

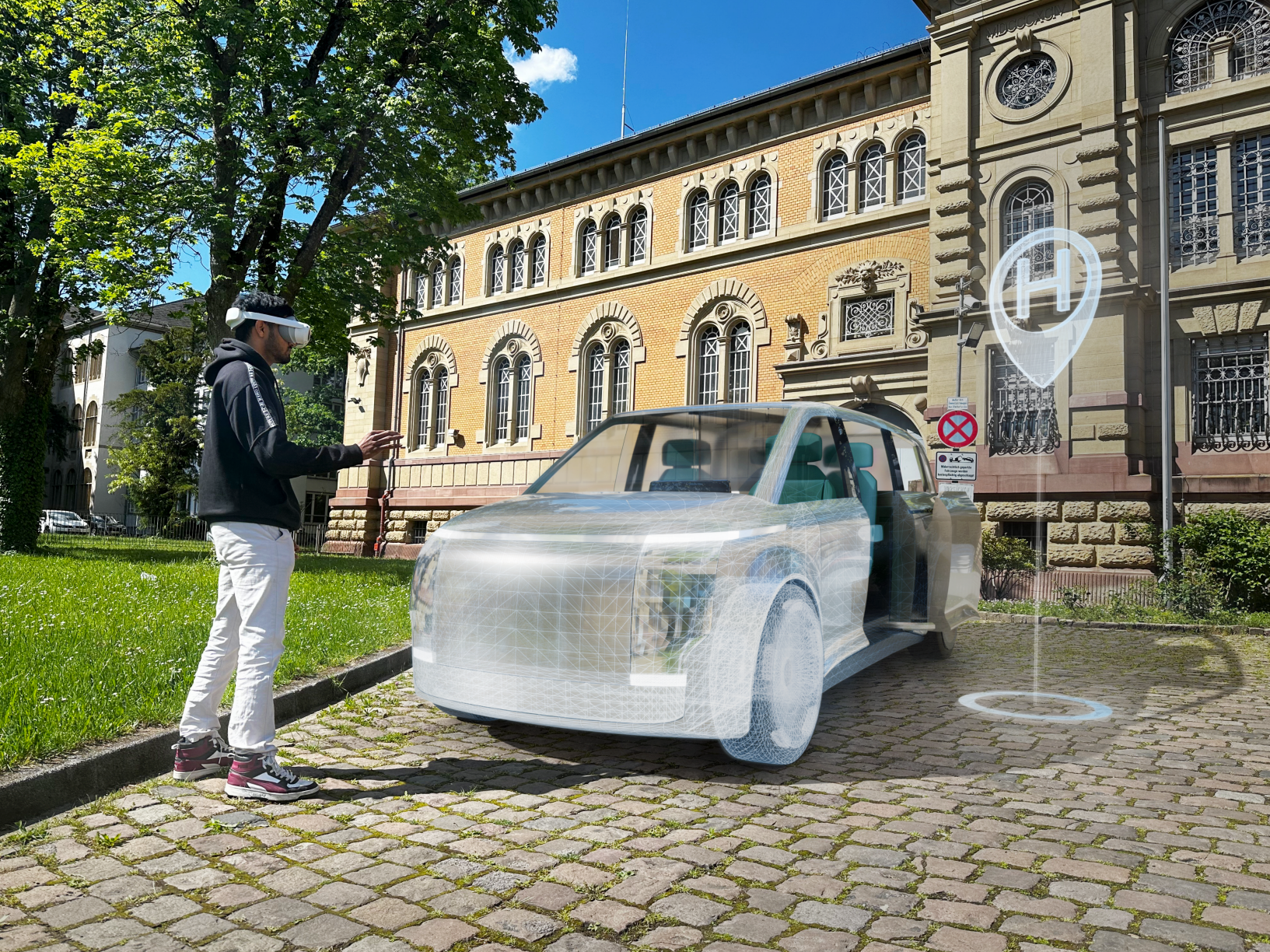


Abb. 1: Während das Fahrzeugkonzept in der Entwicklung ist, werden Varianten in virtueller Realität erprobt.

bestehenden ÖPNVs. Ziel des Projekts ist es, die optimale Kombination aus klassischem ÖPNV und teil-individualisierten Verkehrssystemen zu erforschen, um nachhaltiges, inter- und multimodales Mobilitätsverhalten zu fördern. Dabei wird untersucht, welche Aspekte und welcher Grad an Individualisierung entscheidend sind, um die Nutzung solcher Systeme zu begünstigen und eine Verhaltensänderung herbeizuführen. C2CBridge schlägt somit die Brücke zwischen motorisiertem Individualverkehr und klassischem ÖPNV.

Ergänzt wird dieses Konzept durch intelligente Umsteigehubs, an denen die Nutzenden bequem auf konventionelle ÖPNV-Angebote oder alternative Verkehrsmittel wie Leihräder umsteigen können. Auch hier werden die Bedürfnisse analysiert und erforscht, wie das System gestaltet sein muss, damit es den Anforderungen der vielen verschiedenen potenziellen Nutzendengruppen entspricht. Ein zentraler Aspekt des Projekts ist dabei die Einbindung der Öffentlichkeit. Mithilfe immersiver Visualisierungen werden sowohl Bürgerinnen und Bürger als

auch andere Stakeholder aktiv in den Entwicklungsprozess eingebunden. So können sie die geplanten Fahrzeuge und Hubs realitätsnah erleben und mitgestalten, obwohl diese noch nicht als physische Demonstratoren vorliegen.

C2CBridge kombiniert modernste Verkehrsforschung mit innovativen Ansätzen der Produktentwicklung, um nachhaltige Lösungen zu schaffen, die den Bedürfnissen der Menschen gerecht werden. Simulationen zeigen bereits jetzt das enorme Potenzial: Mit diesem System könnte in Städten nur ein Siebtel der bisherigen Fahrzeuge benötigt werden, um eine vergleichbare Verfügbarkeit mit maximal fünf Minuten Wartezeit zu gewährleisten. Das würde nicht nur das Verkehrsaufkommen und die Emissionen erheblich reduzieren, sondern auch wertvollen Platz in Innenstädten freigeben und die Lebensqualität deutlich steigern. ■

[PROJEKT.EINBLICK]

Philipp Román

Mit Weitwinkel-Wärmekameras und KI zur individuellen Wohlfühltemperatur im Fahrzeug



Im Rahmen des Projekts C2CBridge wurde ein KI-gestütztes 360°-Infrarotkamarasystem entwickelt, das die Temperaturverteilung im Fahrzeug misst, mithilfe von künstlicher Intelligenz ausgewertet, und die Fahrzeugklimatisierung individuell optimiert.

→ Kontakt

Philipp Román

KIT-Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST),
Institutsteil Fahrzeugtechnik

Rintheimer Querallee 2
Gebäude 70.04
76131 Karlsruhe

Tel: +49 721 608 45363

Mail: philipp.roman@kit.edu

Web: www.fast.kit.edu



Die thermische Behaglichkeit oder »Wohlfühltemperatur« von Fahrgästen in Fahrzeugkabinen ist ein komplexes Zusammenspiel verschiedener psychologischer und physiologischer Faktoren.

Herkömmliche Klimaanlage passen sich oft nicht individuell an die Bedürfnisse der Insassen an.

Um dieses Problem zu lösen, haben wir ein innovatives System entwickelt, das mithilfe eines 360°-Infrarot-Kamarasystems die Körpertemperatur der Passagiere in Echtzeit erfasst. Die 360°-Kamera wird eingesetzt, um alle Passagiere unabhängig von ihrer Sitzposition und

Ausrichtung im Fahrzeug zu erfassen, da herkömmliche nach vorn gerichtete Sensoren oft nur begrenzte Bereiche abdecken. Besonders in autonomen oder geteilten Fahrzeugen mit variabler Sitzbelegung ist es entscheidend, dass keine toten Winkel entstehen.

Die Kameras erfassen kontinuierlich die Temperaturverteilung im gesamten Innenraum und ermöglichen so eine präzise Überwachung der individuellen Wärmebedürfnisse.

Die Bilddaten werden durch spezielle Algorithmen verarbeitet, die mithilfe neuronaler Netze und lernender Systeme Muster im thermischen Zustand der Passagiere erkennen. Zwar kann eine Person mit dicker Jacke, Mütze oder langen Haaren von hinten schwerer analysiert werden, doch das System berücksichtigt nicht nur eine einzelne Körperregion, sondern kombiniert Informationen aus Gesicht, Nacken, Händen und Oberkörper.

Abb. 1: Das Bild der thermischen Infrarotkameras deckt 360° des Fahrzeuginnenraums mit präzisen Temperaturmessungen ab. Die Temperatur steigt von dunkelblau über grün zu weiß an.

→ Warum Langwellen-Infrarot?

Ein entscheidender Vorteil der Langwellen-Infrarot-Technologie ist die Möglichkeit der berührungslosen Temperaturmessung. Dies bedeutet, dass die Körpertemperatur der Fahrgäste kontinuierlich und ohne jeglichen physischen Kontakt erfasst werden kann. Dadurch entfällt die Notwendigkeit von tragbaren Sensoren oder anderen störenden Messgeräten, die das Komfortgefühl der Passagiere beeinträchtigen könnten. Diese nicht-invasive Methode gewährleistet zudem eine hygienische und wartungsarme Lösung, die sich besonders für den Einsatz in gemeinsam genutzten Fahrzeugen oder öffentlichen Verkehrsmitteln eignet.

Praxistests

Für die Datenerfassung wurde das System in einem Mercedes Vito Neunsitzer getestet. Hierbei wurden sowohl statische als auch dynamische Szenarien untersucht – also Situationen, in denen Passagiere entweder ruhig sitzen oder ihre Position verändern, indem sie ein- und aussteigen.

Während der Tests bewerteten die Teilnehmenden ihren thermischen Komfort auf einer Skala von »sehr kalt« bis »sehr warm« sowie ihren allgemeinen Wohlfühlfaktor. Diese subjektiven Einschätzungen dienten als Grundlage für die Weiterentwicklung der Algorithmen.

KI-basierte Sensorauswertung

Nachdem die Rohdaten erfasst wurden, durchliefen sie eine umfangreiche Verarbeitung. Um eine höhere Bildauflösung und eine genauere Analyse zu ermöglichen, wurden Rauschunterdrückungstechniken angewandt und die Bilder auf eine höhere Pixelanzahl skaliert.

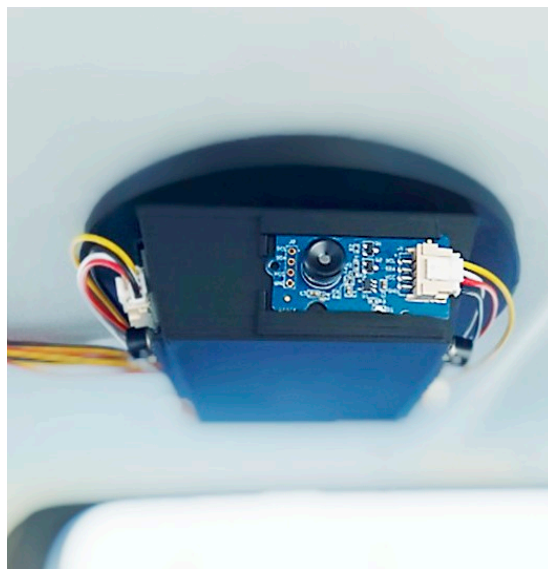


Abb. 2: Das prototypische Messsystem ist im Fahrzeughimmel montiert um alle Fahrzeuginsassen erfassen zu können.

Das System bewältigt die Herausforderung, Personen mit unterschiedlicher Kleidung und aus variierenden Blickwinkeln zu analysieren, indem es gezielt wärmerrelevante Bereiche wie Gesicht, Oberkörper und Sitzflächen isoliert. Mithilfe eines Echtzeit-Objekterkennungsalgorithmus werden diese Regionen aus dem Gesamtbild segmentiert und durch Normierung an externe Einflüsse wie Sonneneinstrahlung oder reflektierende Oberflächen angepasst. Ein neuronales Netz vom Typ ResNet-50 extrahiert wesentliche Temperaturmuster und erkennt Hotspots sowie Temperaturgradienten, während ein LSTM-Netzwerk zeitliche Veränderungen analysiert, etwa wenn sich eine Person bewegt oder sich ihr Wärmeempfinden über die Zeit verändert.

Das System wurde mit subjektiven Rückmeldungen von Testpersonen trainiert, um Wärmemuster mit realem Empfinden zu verknüpfen. Erste Tests zeig-

gen, dass die Methode Wärmewahrnehmungen klassifizieren kann, auch bei wechselnden Sitzpositionen und dynamischen Umweltbedingungen. Weitere Untersuchungen mit größeren Personengruppen und verschiedenen Klimaszenarien sind geplant, um die Robustheit und Genauigkeit weiter zu optimieren.

Ein zentraler Aspekt dieses Projekts ist die Verknüpfung mit dem Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystem des Fahrzeugs. Das System soll in Echtzeit Parameter wie Luftstrom und Temperatur den individuellen Bedürfnissen der Passagiere anpassen.



Das System soll in Echtzeit Parameter wie Luftstrom und Temperatur den individuellen Bedürfnissen der Passagiere anpassen.«

Dies soll nicht nur zu einem besseren Wohlbefinden der Insassen führen, sondern auch zu einer höheren Energieeffizienz, da nur dort geheizt oder gekühlt wird, wo es wirklich notwendig ist.

Über den Anwendungsbereich in Fahrzeugen hinaus könnte diese Technologie auch für andere Bereiche interessant sein, etwa für öffentliche Verkehrsmittel oder smarte Gebäudeklimatisierungssysteme.

Ein weiterer potenzieller Nutzen liegt in der Bekämpfung von Reisekrankheit, da Temperaturschwankungen oft ein Faktor für Unwohlsein in automatisierten Fahrzeugen sind.

Wie geht es weiter?

Obwohl die bisherigen Ergebnisse vielversprechend sind, gibt es noch einiges zu tun. Weitere Tests unter verschiedenen klimatischen Bedingungen und in unterschiedlichen Fahrzeugtypen sind erforderlich, um das System weiter zu verbessern.

Zudem könnten modernere maschinelle Lernverfahren die Vorhersagegenauigkeit weiter steigern und eine noch individuellere Anpassung ermöglichen.

Die Forschung wird im Rahmen des C2CBridge-Projekts des Karlsruher Instituts für Technologie durchgeführt und vom Bundesministerium für Verkehr gefördert. ■

→ Infrarot im automatisierten Fahren

Licht aus dem infraroten Spektrum spielt im automatisierten Fahren unterschiedliche Rollen. Verbindend ist, dass es langwelliger (aber nicht per se uninteressanter) als rotes Licht ist, und so vom menschlichen Auge nicht mehr gesehen werden kann: Es liegt außerhalb des sichtbaren Spektrums von etwa 380 nm (violett) bis 750 nm (rot). Wir geben einen Überblick über einige wichtige Anwendungsfälle.

Nahes Infrarot (NIR) bezeichnet Licht im Wellenlängenbereich von etwa 750–1400 nm. Es hat im Wesentlichen dieselben Eigenschaften wie sichtbares Licht, nur, dass das menschliche Auge es nicht wahrnehmen kann. Damit wird NIR insbesondere eingesetzt, wo aktive Beleuchtung benötigt wird, die für Menschen nicht störend sein soll – unter anderem für Kamerafunktionen im Innenraum.

Ein wichtiger Anwendungsbereich liegt zudem in Laserscannern oder LiDAR (Light Detection and Ranging), bei dem Laserstrahlen ausgesendet werden, und anhand ihrer Laufzeit bis zum Empfang eines Echos die Distanz zu einem Ziel errechnet werden kann. LiDAR gilt als Schlüsseltechnologie für automatisiertes Fahren, und ermöglicht es, in Reichweiten von 200 m und mehr noch zentimetergenau Objekte zu erkennen. LiDAR-Lichtquellen liegen typischerweise im Bereich von 800 nm bis 1600 nm, und damit an der Schwelle zwischen NIR und SWIR (s.u.).

LiDAR-Systeme und andere Laserlichtquellen im NIR-Bereich können für das menschliche Auge bei starker Bestrahlung schädlich sein, da NIR-Licht das Auge durchdringen und die Netzhaut schädigen kann. Riskant ist hier gerade seine Unsichtbarkeit, denn diese vermeidet Blinzeln und andere Schutzreflexe bei Blendung. Daher dürfen LiDAR-Systeme im NIR-Bereich nur mit relativ niedrigen Intensitäten arbeiten.

Kurzwelliges Infrarot (SWIR, short-wavelength infrared) schließt an NIR an. Wesentlich ist, dass ab etwa 1500 nm das menschliche Auge wesentlich undurchlässiger wird, und somit Augenrisiken durch SWIR-Laser erheblich reduziert sind. Das ermöglicht höhere Intensitäten und im Allgemeinen bessere Reichweiten für LiDAR-Systeme, die ab 1600 nm arbeiten. Gleichzeitig ist die Empfangssensorik in der Regel aufwendiger und teurer.

Langwelliges oder »thermisches« Infrarot (LWIR) liegt bei 8 000–15 000 nm (bzw. 8–15 µm), und wird insbesondere für Wärmebildkameras genutzt. In diesem Bereich ist die Wärmestrahlung des menschlichen Körpers empfangbar, womit unterschiedliche Anwendungen realisierbar sind, von berührungslosen Temperaturmessungen bis hin zu Nachtsicht. Kameras, die im LWIR-Bereich empfindlich sind, sind aufwendig zu produzieren, und weisen daher oft nur eine deutlich geringere Auflösung auf.

Allgemein gilt, dass langwelligeres Licht immer unempfindlicher gegen Störungen wie Regen und Nebel wird. Jenseits des Infrarotbereichs schließen nach Mikrowellen noch Radiowellen an, die im automatisierten Fahren für Radar (Radio Detection and Ranging) mit Wellenlängen im Zentimeterbereich eingesetzt werden. Aufgrund seiner hohen Wellenlänge kann Radar auch starken Regen sehr gut durchdringen.

Warum brauchen wir das Projekt C2CBridge? Ein Gespräch mit Professor Gauterin und Professor Vortisch



Im März 2024 übergab Professor Frank Gauterin vom Institut für Fahrzeugsystemtechnik am KIT die wissenschaftliche Leitung des KAMO: Karlsruhe Mobility Leistungszentrums an Professor Peter Vortisch vom Institut für Verkehrswesen am KIT. Beide haben über 15 Jahre die Mobilitätsforschung in Karlsruhe geprägt, das Leistungszentrum aufgebaut und die erfolgreiche Beantragung des Projekts »C2CBridge« für den Standort erreicht. Im Interview sprechen wir mit ihnen darüber, welchen Mehrwert solche Forschungsprojekte leisten und wie sich die Mobilität der Zukunft entwickeln sollte.

Herr Professor Gauterin, Sie waren von 2006 an in der kollegialen Leitung des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des KIT und haben seit 2020, gemeinsam mit Professor Vortisch und anderen, für die Einrichtung eines Standorts des Deutschen Zentrums Mobilität der Zukunft (DZM) in Karlsruhe gekämpft. Das Projekt ist nun 2024 offiziell gestartet und zum ersten April 2024 sind Sie in den wohlverdienten Ruhestand gegangen. Wie fühlt sich das an?

Prof. Frank Gauterin: Die Anbahnung größerer öffentlich geförderter Projekte hat häufig einen langen Vorlauf. In diesem Fall kamen Corona und der Wechsel der Bundesregierung hinzu. Da kann es schon mal passieren, dass der Initiator die Durchführung des Projekts nicht mehr selbst begleiten kann. In den Händen des Karlsruher Projektteams, das aus vielen Instituten des KIT, der Fraunhofer-Gesellschaft, des FZI Forschungszentrums Informatik und der Hoch-

schule Karlsruhe stammt, ist das Projekt bestens aufgehoben.

Herr Professor Vortisch, Sie haben 2024 von Herrn Professor Gauterin die Leitung des Leistungszentrums übernommen. Sie leiten auch das Institut für Verkehrswesen (IfV), und sind unter anderem für das Projekt C2CBridge und den DZM-Standort Karlsruhe als wissenschaftlicher Sprecher verantwortlich. Wie passt das alles unter einen Hut?

Prof. Peter Vortisch: Thematisch passt das eigentlich ganz gut: Auch wenn der Großteil der Forschung, die von den KAMO-Mitgliedern gemacht wird, eher technischer Natur ist, verbindet uns doch alle, dass sich Fahrzeuge und Personen in einem großen Gesamtsystem »Mobilität« treffen. Die Verkehrswissenschaft hat schon immer eher das Gesamtsystem im Blick gehabt als die einzelnen technischen Lösungsbeiträge, insofern ist es nicht abwegig, dass ich als Verkehrswissenschaftler in die Sprecherrolle

→ **Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin...**

... studierte Physik für Lehramt und Diplom an der Universität Münster und wurde an der Universität Oldenburg promoviert.

Anschließend arbeitete er 17 Jahre in der freien Wirtschaft im Bereich der Forschung und Entwicklung bei der Continental AG, zuletzt als Direktor im Bereich Geräusch- und Schwingungskomfort sowie Verkehrslärm.

2006 kehrte er in die Wissenschaft zurück, als er zum Professor für Fahrzeugtechnik am KIT berufen wurde und zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer das Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) initiierte und kollegial leitete. Er war unter anderem Sprecher des KIT-Zentrums Mobilitätssysteme, Beirat der Landesagentur e-mobil BW GmbH und Initiator sowie Mit-Initiator zahlreicher Projektinitiativen am Standort Karlsruhe, die den Grundstein für die interdisziplinäre Zusammenarbeit gelegt haben.

Von 2016 bis zu seinem Ruhestand 2024 war er Sprecher des Leistungszentrums »Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe«, das 2024 unter seiner Leitung in »KAMO: Karlsruhe Mobility« umbenannt wurde.

→ **Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch...**

... studierte bis 1992 an der Universität Karlsruhe (TH) mit Nebenfach Verkehrswesen, und arbeitete anschließend als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe.

1998 wechselte er zur PTV Planung Transport Verkehr AG, wo er 1999 die Abteilungsleitung für den Bereich Verkehrstelematik übernahm, 2000 die Bereichsleitung für »Produkte Verkehrstechnik«, und ab 2006 die Prokura erhielt. Im selben Jahr wurde er an der Universität Karlsruhe zum Dr.-Ing. promoviert.

2010 wechselte auch er zurück in die Wissenschaft, und übernahm die Professur für Verkehrswesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und die Leitung des Instituts für Verkehrswesen.

Seit 2016 ist er im Lenkungskreis des Leistungszentrums »Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe« bzw. seit 2024 »KAMO: Karlsruhe Mobility« engagiert. 2024 übernahm er, anlässlich dessen Verabschiedung in den Ruhestand, die Sprecherschaft des Leistungszentrums von Prof. Frank Gauterin.

le gehe. Und wissenschaftlicher Sprecher bedeutet ja auch nicht strenge Leitung im hierarchischen Sinn, sondern eher interne Abstimmung und externe Kommunikation. Für unser Großprojekt C2CBridge gibt es ja auch einen Vollzeit-Projektmanager in Person von Dr. Matthias Vollat.

Warum war der Antrag für Karlsruhe erfolgreich?

Vortisch: Da haben viele Aspekte zusammengespielt. Eine Grundlage war, dass im Entstehungsprozess des DZM der Standort Karlsruhe gesetzt wurde. Das führe ich vor allem auf die gute politische Arbeit Karlsruhes in Berlin zurück, insbesondere auf den Einsatz unseres Oberbürgermeisters, Dr. Frank Mentrup. Als später Verkehrsminister Dr. Volker Wissing das DZM kritischer sah, hat sich Staatssekretär Michael Theurer als Karlsruher Abgeordneter für uns eingesetzt. Das DZM war ja eine Initiative aus der Politik und deshalb war auch erst einmal politische Arbeit notwendig, die Förderung in dem doch beträchtlichen Umfang zu ermöglichen.

Dass Karlsruhe überhaupt als Standort in Frage kam, liegt daran, dass wir hier sehr viel mobilitätsbezogene Forschung machen und dass wir die vielen Akteure schon früh in einem gut organisierten Netzwerk zusammengebracht haben. Wir sind beim DZM als »Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe« aufgetreten (dem Vorläufer von KAMO), und das hat ge-

reicht, um noch ohne konkretes Thema aufgenommen zu werden. Daran sieht man, wie viel Masse Karlsruhe in der Mobilitätsforschung auf die Waage bringt.

Gauterin: Das Bundesverkehrsministerium war beeindruckt vom Teamgeist des seit Jahren bestehenden Forschungsverbunds KAMO, in dem bereits in vielen Projekten nachgewiesen wurde, wie fruchtbar die Zusammenarbeit der mobilitätsforschenden Einrichtungen in Karlsruhe ist und welch großen Rückhalt KAMO seitens der Stadt Karlsruhe, ihrer Verkehrsbetriebe, der TechnologieRegion Karlsruhe (TRK) und im Land Baden-Württemberg genießt. Offenbar wurde im Bundesministerium auch die Ausrichtung des Projekts C2CBridge als zukunftsweisend gesehen, da es aus mehreren von KAMO und der Stadt Karlsruhe vorgeschlagenen Themen ausgewählt wurde.

Vortisch: Schließlich braucht man bei allem Rückenwind auch ein gutes Forschungsthema. Ich war in den Gründungsbeirat des DZM berufen worden, wo diskutiert wurde, welche Themen das DZM bespielen soll. Auf der Karlsruher Seite haben wir uns in einer vom OB geleiteten Arbeitsgruppe Gedanken gemacht, welche Themen am besten zu unserer Ausgangslage passen. Wir haben dem BMDV vier Projekte zur Auswahl vorgeschlagen, das sich schließlich für C2CBridge entschieden hat. Bei der Konzeption der Projektvorschläge hatten wir dar-

auf geachtet, dass wir bei jedem, wenn auch in unterschiedlicher Gewichtung, möglichst viele lokale Partner mitnehmen können.

Karlsruhe war also erfolgreich, weil wir Substanz in der Forschung haben, weil wir organisiert als Netzwerk auftreten konnten und weil unsere politischen Vertreter sich reingehängt haben.



Karlsruhe war erfolgreich, weil wir Substanz in der Forschung haben, weil wir organisiert als Netzwerk auftreten konnten und weil unsere politischen Vertreter sich reingehängt haben«

Prof. Peter Vortisch

Sind Projekte zum automatisierten Fahren noch zeitgemäß? Sollte man nicht eher darauf setzen, bestehende Lösungen wie Bus und Bahn auszubauen?

Vortisch: Naja, natürlich sind die noch zeitgemäß. Wir müssen uns ja überlegen, wie wir die neuen technischen Möglichkeiten, die uns die Automatisierung der Fahraufgabe bietet, am besten im Gesamtsystem einsetzen. In genau dem Sinn verstehe ich auch unser Projekt C2CBridge. Die Frage zielt vielleicht darauf, ob die Idee, mit Pkw-artigen automatisierten Fahrzeugen anzutreten, die richtige ist?

Ja, das war unter anderem gemeint.

Vortisch: Darüber haben wir bei der Entwicklung der Projektidee viel diskutiert. Mein Kollege war mit der Vision gestartet, dass die geteilten Ruftaxis sehr weitgehend die Funktion des heutigen öffentlichen Verkehrs übernehmen. Ich hingegen halte auch in der Zukunft den liniengebundenen öffentlichen Verkehr mit seinen großen Fahrzeugen und der daraus resultierenden hohen Leistungsfähigkeit für das Rückgrat des Verkehrs, zumindest in der Stadt. Wenn wir diese Fahrzeuge auch automatisieren, umso besser. Wir müssen vor allem die optimale Kombination der Technologien finden.

Gauterin: Der Ausbau von Bus und Bahn ist wichtig. Sie spielen ihre Stärke dort aus, wo hohe Transportkapazitäten benötigt werden (Bahn) und wo Menschen in einem Gebiet sehr hoher Bevölkerungsdichte befördert werden müssen (Bus). Auf dem Land sind klassische Linienbusse wegen der weiten Strecken und geringen Fahrgastzahlen unwirt-



Abb. 1: »Das Bundesverkehrsministerium war beeindruckt vom Teamgeist des Forschungsverbunds KAMO, in dem bereits in vielen Projekten nachgewiesen wurde, wie fruchtbar die Zusammenarbeit der mobilitätsforschenden Einrichtungen in Karlsruhe ist« – Professor Frank Gauterin

schaftlich und können die individuellen Mobilitätswünsche nicht abdecken. Abgesehen von den hohen Kosten kann ein dichtes und hochfrequentes Busnetz in der Fläche schon wegen des Personalman- gels an Fahrerinnen und Fahrern nicht umgesetzt werden. Hier bieten kleine autonome Rufbusse eine Lösung.

Welche Rolle spielt denn der ländliche Raum für die Transformation der Mobilität?

Vortisch: »Transformation der Mobilität« finde ich einen ganz schwierigen Begriff. Die realisierte Mobilität ist über die Jahrzehnte ziemlich gleich geblieben, was die Anzahl von Wegen angeht, die Personen unternehmen. Auch die Anzahl Kilometer pro Person hat sich im deutschen Durchschnitt nur wenig verändert, und konstante drei Viertel der Kilometer werden im Auto gemacht. Das System insgesamt ist also sehr träge. Wenn wir von »Verkehrswende« sprechen, meinen wir meistens die Abkehr vom Auto. Das ist aber im Wesentlichen ein Wunsch, der aus den großen Städten kommt.



Ich halte auch in der Zukunft den liniengebundenen öffentlichen Verkehr mit seinen großen Fahrzeugen und der daraus resultierenden hohen Leistungsfähigkeit für das Rückgrat des Verkehrs, zumindest in der Stadt.«

Prof. Peter Vortisch

Gauterin: Wer auf dem Land lebt, ist heute in den meisten Fällen auf ein eigenes Auto angewiesen. Mit dem wird dann auch in die Stadt gefahren, weil es bequem und schnell ist. In der Stadt ergeben sich dadurch Staus, viel Parkplatzsuchverkehr, viel ruhender Verkehr sowie Belastung der Menschen in der Stadt mit Schadstoffen, Lärm und eingeschränktem Lebensraum. Daraus folgt, dass öffentliche Verkehrsmittel auf dem Land um flexible und angenehm nutzbare Angebote ergänzt werden müssen, die eine echte Alternative zur Nutzung des eigenen Autos darstellen. Dies macht auch das Leben auf dem Land attraktiver.

Vortisch: Wir haben also in der Stadt und auf dem Land erst mal verschiedene Probleme, aber die Diskussion wird stark von der städtischen Perspektive dominiert. Dazu gibt es übrigens eine schöne Stellungnahme des wissenschaftlichen Beirats.¹ Aber wie erwähnt sind Stadt und Land eben nicht separate Welten, für die man jeweils das optimale System aufsetzen kann. Die Städte haben eine raumplanerisch vorgegebene zentrale Funktion für das Umland, und das heißt, dass es Verkehr zwischen Stadt und Land geben muss, und der muss mit beiden Welten kompatibel sein. Einfach mit dem Auto in die Stadt fahren ist keine Lösung, und umgekehrt bringt uns der konventionelle ÖPNV im ländlichen Raum nicht überall hin. Die Frage ist, wie gestalten wir den Übergang? Ziemlich sicher geht es nicht ohne Umsteigen zwischen den Systemen, wir brauchen eine Art modernes Park&Ride.



Abb. 2: »Wenn wir von »Verkehrswende« sprechen, meinen wir meistens die Abkehr vom Auto. Das ist aber im Wesentlichen ein Wunsch, der aus den großen Städten kommt.« – Professor Peter Vortisch

Im Projekt geht es um die Automatisierung eines Fahrzeugs, aber auch um Gestaltung des Fahrzeuginnenraums, Betriebskonzepte und die Haltestelleninfrastruktur. Wie hat das alles miteinander zu tun?

Gauterin: Damit ein autonomer Rufbus eine Alternative zum eigenen Auto sein kann, muss er möglichst viel von dem bieten, was das eigene Auto leistet. Er muss fahren, wenn ich fahren möchte, und er soll möglichst schnell an mein Ziel kommen. Also darf der Bus nicht zu groß sein, damit er nicht zu viele andere Orte anfahren muss, die mich persönlich nicht interessieren. Er muss mir Privatsphäre bieten, auch wenn andere Menschen mit an Bord sind. Also braucht der Bus eine ganz andere Innenraumgestal-



Auf dem Land sind klassische Linienbusse wegen der weiten Strecken und geringen Fahrgastzahlen unwirtschaftlich und können die individuellen Mobilitätswünsche nicht abdecken. Hier bieten kleine autonome Rufbusse eine Lösung.«

¹ bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/wissenschaftlicher-beirat-gutachten-mobilitaetswende.html

Prof. Frank Gauterin

tung als bisherige Busse. Das Fahrzeug fährt autonom. Es muss mir das gute Gefühl geben, dass ich in ihm sicher unterwegs bin. Also braucht es geeignete Informationen für die Fahrgäste während der Fahrt, Eingriffsmöglichkeiten der Fahrgäste, Kontaktmöglichkeiten mit einer Leitzentrale und vieles Weitere.



Damit ein autonomer Rufbus eine Alternative zum eigenen Auto sein kann, muss er möglichst viel von dem bieten, was das eigene Auto leistet.«

Prof. Frank Gauterin

Vortisch: Der Projektträger hat uns in der Antragsphase aufgegeben, auch Grundlagenaspekte zu betonen. Auch wenn wir immer das Gesamtsystem im Auge behalten, haben wir in C2CBridge sehr viele Einzelaspekte adressiert, die jeweils einen Beitrag zur Verbesserung der Mobilität oder zumindest zur Verbesserung des Verständnisses der Mobilität leisten. Wir entwickeln nicht nur Automatisierung an sich, sondern viele Aspekte, die alle darauf einzahlen, am Ende ein attraktives Verkehrssystem anbieten zu können. Und dazu gehören nun einmal ganz verschiedene Details, wie ein angenehmes Reiseerlebnis im Fahrzeug, eine betriebs- und volkswirtschaftliche Tragfähigkeit, eine effiziente Disposition der Fahrzeuge, komfortables Umsteigen an den richtigen Stellen, und vieles mehr.

Gauterin: Da jede und jeder Reisende ein eigenes Ziel hat, wird es ganz ohne Umsteigen nicht gehen, das ist erst mal ein Nachteil gegenüber dem eigenen Auto. Wenn aber die Haltestelle so gestaltet ist, dass ich mich dort sicher fühle, es trocken und warm ist, ich die Zeit für einen Kaffee, zum Einkaufen, Arbeiten oder Entspannen nutzen kann, dann muss dieser Nachteil nicht schwer wiegen. Daher gehört die Entwicklung attraktiver Haltestellen zum Projekt C2CBridge unbedingt dazu.

Vortisch: Stellen Sie sich einfach vor, wie eine Reise von Haustür zu Haustür verläuft und was einem dabei mehr oder weniger gefallen kann. Wir arbeiten daran, dass es insgesamt mehr von den positiven Erlebnissen gibt.

Und wie sieht es mit den positiven Erlebnissen anderer Verkehrsteilnehmender aus? Wie können manuell gesteuerte und automatisierte Fahrzeuge, Radfahrerinnen und Radfahrer, Fußgängerinnen und Fußgänger sich den urbanen Verkehr teilen?

Gauterin: Durch gegenseitige Rücksichtnahme. Die ist leichter zu erreichen, wenn der Verkehrsraum nicht zu beengt ist. Wenn es gelingt, durch attraktive Angebote im öffentlichen Verkehr die Anzahl der in die Stadt einfahrenden und dort parkenden Privatfahrzeuge zu verringern, wird der Verkehrsraum für andere Verkehrsteilnehmer weniger eingeschränkt.



Wenn es gelingt, durch attraktive Angebote die Anzahl der in die Stadt einfahrenden und dort parkenden Privatfahrzeuge zu verringern, wird der Verkehrsraum für andere Verkehrsteilnehmer weniger eingeschränkt«

Prof. Frank Gauterin

Vortisch: In den Städten wird es mehr und mehr zu einer Neuverteilung der verfügbaren Flächen kommen, und zwar zu Ungunsten des Autos. Ich denke, wir werden immer mehr Städte sehen, in denen es dafür kommunalpolitische Mehrheiten gibt. Die städtischen Straßennetze, die zum Teil über Jahrzehnte historisch gewachsen sind, werden neu strukturiert werden, die erlaubten Geschwindigkeiten werden eher sinken. Der aktiven Mobilität, also Rad- und Fußverkehr, wird mehr Platz eingeräumt werden. Das alles hat wenig bis nichts mit automatisiertem Verkehr zu tun. Praktisch alle Studien sagen vorher, dass eine Vollautomatisierung der Pkw zu einer Steigerung des Autoverkehrs führen wird. Dagegen werden die Städte Maßnahmen ergreifen. Das problemlose Zusammenwirken von menschlich gesteuerten Fahrzeugen und automatisierten Fahrzeugen ist eine ganz andere, eine technische Aufgabe, zu der es mehrere laufende Forschungsprojekte gibt, zum Beispiel das Projekt MiRoVA² der DFG, an dem wir beteiligt sind.

Gauterin: Auch vor diesem Hintergrund ist es wichtig, den C2CBridge-Ansatz zu einem gut in den be-

² ifv.kit.edu/forschungsprojekte_2343.php



Praktisch alle Studien sagen vorher, dass eine Vollautomatisierung der Pkw zu einer Steigerung des Autoverkehrs führen wird. Dagegen werden die Städte Maßnahmen ergreifen.«

Prof. Peter Vortisch

stehenden öffentlichen Verkehr integrierten Angebot zu entwickeln.

Der DZM-Standort in Karlsruhe arbeitet an automatisiertem Fahren auf der Straße. Andere DZM-Standorte arbeiten an Schienenverkehr oder Infrastruktur. Entstehen Kompetenzinseln?

Vortisch: Das DZM war immer als Forschungsnetzwerk angelegt, in dem durch das Zusammenwirken der Standorte zusätzlicher Nutzen geschaffen wird. Der Erfolg der ganzen DZM-Konstruktion wird nicht zuletzt daran gemessen werden, was über die Einzelprojekte hinaus erreicht wird.

Gauterin: Aufgrund der Komplexität der Themen ist eine thematische Fokussierung an den einzelnen Standorten unumgänglich. Da aber Mobilität nur dann gut funktioniert, wenn die verschiedenen Mobilitätssysteme abgestimmt ineinandergreifen, gibt es im DZM mehrere fest eingeplante Instrumente zum gegenseitigen Austausch. Dazu gehören die Stakeholder-Dialoge, bei denen potenzielle Nutzer, Betreiber, Hersteller und kommunale Stellen gemeinsam Anforderungen, Randbedingungen und Lösungsmöglichkeiten diskutieren, woran jeweils alle DZM-Standorte teilnehmen. Auf den jährlichen DZM-Konferenzen berichten und diskutieren die Standorte über ihre Projekte.

Vortisch: Dann gibt es zum Beispiel »Hot-Topic-Seminare«, in denen jeweils ein Standort für die anderen Fortbildung anbietet in einem Thema, in dem er besonders gut ist. Für den wissenschaftlichen Nachwuchs veranstalten wir eine gemeinsame »Winter-School«, bei der man die Themen der anderen Standorte kennenlernen kann.

Gauterin: Schließlich treffen sich die Projektleitungen der Standorte alle Vierteljahre, um sicherzustellen, dass die aktualisierten Projektplanungen allen bekannt und untereinander abgestimmt sind sowie die Vorhaben und ihre Ergebnisse in geeigneter Weise der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Vortisch: Es ist ziemlich gut sichergestellt, dass Erkenntnisse, die an einem Standort erarbeitet werden, auch den anderen Standorten bekannt werden, wenn sie dort nützlich sind. Schon bei unserer ersten Vernetzungskonferenz haben wir festgestellt, dass es bei der Automatisierung von Straßen- und Schienenfahrzeugen eine Menge übergreifender Themen gibt. Sicher hat jeder Standort seinen fachlichen Schwerpunkt, aber von Inseln kann man wirklich nicht sprechen.

Und was ist für Sie die langfristige Mobilität der Zukunft?

Gauterin: Ich hoffe auf den Erfolg nachhaltiger Verkehrsmittel: Viele elektrische Fahrzeuge auf Straße und Schiene, zunehmend autonome Fahrzeuge im öffentlichen Verkehr und im Güterfernverkehr, E-Fuels im Flugverkehr. Und C2CBridge zur Anbindung des Lands an die Stadt als attraktive Alternative zum eigenen Fahrzeug.

Vortisch: Im Vergleich zu meinen technikbegeisterten Kolleginnen und Kollegen bin ich oft der Stimmungskiller, denn ich glaube, dass sich an unserem Mobilitätssystem nur sehr langsam etwas verändern wird. Einer meiner populärwissenschaftlichen Vorträge hat den Titel »Evolution statt Revolution«. Wenn Sie wie wir einen Forschungsschwerpunkt in der Verkehrsstatistik haben und sehen, wie unbeweglich die Eckwerte der Mobilität über Jahrzehnte sind, werden Sie vorsichtig mit Vorhersagen großer Veränderungen.

Wir haben einige Kernprobleme, die wir lösen müssen: CO₂-Freiheit der Antriebe, weniger Autos in den Städten, mehr öffentlicher Verkehr auf dem Land. Das erste können wir technisch lösen, das zweite erfordert eine Verhaltensänderung und das letzte braucht mehr Geld. Technischer Fortschritt wird uns dabei helfen: Automatisierung kann ÖV billiger machen, Leichtbau und Elektrifizierung werden Energie sparen, Assistenzsysteme werden Unfälle verhindern. Für mich sieht das Mobilitätssystem in zwanzig Jahren strukturell noch ganz ähnlich aus wie heute, nur in vielen Aspekten ein bisschen effizienter, ein bisschen komfortabler, ein bisschen sicherer. Und vielleicht wird ja sogar die Bahn bis dahin wieder zuverlässig...

Welche Rolle soll das KAMO Leistungszentrum da spielen?

Gauterin: Über 30 Institute des KIT, vier Fraunhofer-Institute, das FZI Forschungszentrum Informatik und mehrere Institute der Hochschule Karlsruhe be-

sitzen gemeinsam eine sehr breit gefächerte und gleichzeitig tiefgehende Kompetenz in der Mobilitätsforschung. Hinzu kommen der Erfahrungsschatz und die Gestaltungskraft der Stadt Karlsruhe und Ihrer Verkehrsbetriebe. KAMO bringt durch seine Projekte, aktuell insbesondere durch C2CBridge, diese Kompetenzen in einen intensiven Austausch. Diese Zusammenarbeit wird in KAMO seit fast zehn Jahren praktiziert, wodurch ein hohes Maß an Vertrauen und Teamgeist entstanden ist. Zusammen mehr erreichen wird hier tagtäglich erlebt. Das macht Karlsruhe zu einem guten Ort der Mobilitätsforschung.

Vortisch: Die Partner in KAMO arbeiten an praktisch allen Aspekten des Mobilitätssystems, von der sozialwissenschaftlichen Betrachtung der Entstehung von Mobilitätswünschen bis zur Verbesserung von Materialien für Antriebe und Fahrzeuge. Dadurch, dass wir alles an einem Ort haben und uns gut kennen, ist es für uns leichter, dass alle das Gesamtsystem im Blick haben. Durch die aktive Vernetzung in KAMO können wir neue Fragestellungen schnell aufgreifen und, wie wir gesehen haben, bei Gelegenheiten wie der Förderung im DZM koordiniert zugreifen. Und dass wir jetzt beim DZM dabei sind, erweitert unser Netzwerk sogar noch räumlich und thematisch.

Das Interview wäre nicht vollständig ohne die Frage: Wann ist es denn nun endlich so weit mit dem autonomen Fahren?

Vortisch: Früher habe ich immer gesagt, es ist wie bei der Kernfusion: seit 50 Jahren in 10 Jahren marktreif. Da ich kein Fahrzeugtechniker bin, weiß ich die Antwort nicht. Ich sehe aber, dass es in der letzten Zeit ziemlich schnell voran geht. Vor ein paar Jahren war ich noch ernüchtert, als ich in einem »autonomen Kleinbus« mitgefahren bin, der wenig mehr als ein rollendes Verkehrshindernis war. Aber wenn ich heute sehe, dass Waymo in amerikanischen Städten pro Woche 200.000 Taxi-Fahrten autonom absolviert, scheinen wir der Praxistauglichkeit doch schon recht nah zu sein.

Gauterin: Meiner Einschätzung nach werden wir in den Dreißigerjahren zunehmend Anwendungen des autonomen Fahrens in der Öffentlichkeit sehen.

Vielen Dank für das Gespräch!

→ C2CBridge im Überblick

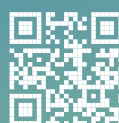
Das Projekt »Country-to-City Bridge«, kurz C2CBridge, gliedert sich in zwei Teilprojekte, die insgesamt von 2024 bis 2027 laufen.

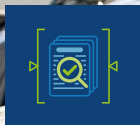
Im ersten Projekt »Country-to-City Bridge 1 – Analyse und funktionale Lösungskonzepte« wird aufbauend auf einer Analyse des bestehenden Verkehrssystems sowie des Mobilitätsverhaltens und der Mobilitätsbedürfnisse eine Konzipierung des neuen Mobilitätsangebots und den einzelnen Elementen wie beispielsweise Fahrzeuge und Umsteigestationen fokussiert. Das Projekt C2CBridge 1 läuft von Januar 2024 bis Dezember 2026 und wird durch das Bundesministerium für Verkehr (BMV) im Rahmen des Deutschen Zentrums Mobilität der Zukunft (DZM) mit insgesamt 12,3 Millionen Euro gefördert. Beteiligt am Vorhaben sind neben dem Karlsruher Institut für Technologie und der Hochschule Karlsruhe mit dem Baden-Württemberg Institut für Nachhaltige Mobilität (BWIM) das FZI Forschungszentrum Informatik sowie die Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

Im zweiten Projekt »Country-to-City Bridge 2« steht die Umsetzung der Konzepte mit dem Umbau und der Automatisierung von Fahrzeugen sowie einer Gestaltung von Innenraumkonzepten sowie der Aufbau einer Umsteigestation und digitaler Zwillinge zusammen mit der Validierung des entwickelten Mobilitätssystems im Fokus. Das Projekt C2CBridge 2 läuft von August 2024 bis Juli 2027 und wird durch das Bundesministerium für Verkehr (BMV) im Rahmen des Deutschen Zentrums Mobilität der Zukunft (DZM) mit insgesamt 12,7 Millionen Euro gefördert.

Das Gesamtvorhaben C2CBridge ist eingebettet in das Deutsche Zentrum Mobilität der Zukunft (DZM), das mit seinen vier Standorten Hamburg, Annaberg-Buchholz, Minden und Karlsruhe ein bundesweites Forschungsnetzwerk aufspannt und Expertise in der Mobilitätsforschung bündelt. Während der Projektlaufzeit und darüber hinaus vernetzen sich die Standorte über eine Reihe von Veranstaltungen. Diese dienen der Kommunikation in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft sowie der Kooperation der Standorte untereinander. Jährlich rollierende Konferenzen, Seminare und Winter Schools bringen die WissenschaftlerInnen der Standorte zusammen. Eine kontinuierliche Abstimmung zwischen den Projekten auf Arbeits- und Leitungsebene erschließt Synergien und erlaubt, die Projektergebnisse auf Übertragbarkeit zu überprüfen.

kamo.one/c2c-bridge/





In der Rubrik [FORSCHUNG.KOMPAKT] stellen wir aktuelle Forschungsergebnisse übersichtlich und frei zugänglich dar, die eine wissenschaftliche Begutachtung (»Peer Review«) durchlaufen haben. Die Originalfassung dieses Artikels wurde veröffentlicht unter M. Heinrich, M. Zipfl, M. Uecker, S. Ochs, M. Gontscharow, T. Fleck, J. Doll, P. Schörner, C. Hubschneider, M. R. Zofka, A. Viehl und J. M. Zöllner, "Co-Car NextGen: a Multi-Purpose Platform for Connected Autonomous Driving Research," 2024 IEEE 27th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Edmonton, Canada, 2024, und kann unter der nebenstehenden Adresse abgerufen werden.



<https://arxiv.org/abs/2404.17550>

[TECHNIK.CHECK & FORSCHUNG.KOMPAKT]

Sven Ochs, Marc Heinrich, Marc René Zofka, J. Marius Zöllner

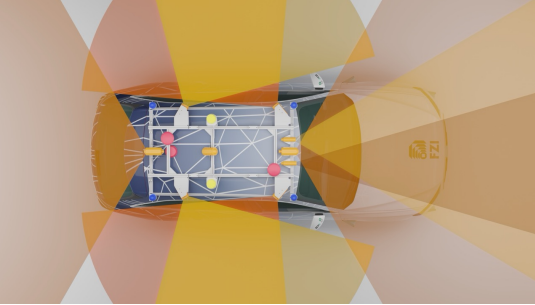
CoCar NextGen: Wegweisende Forschungsplattform für das automatisierte und vernetzte Fahren



Das Testen in der realen Welt ist von entscheidender Bedeutung für den Erfolg des automatisierten Fahrens. Während viele Akteure in der Branche eigens für Testzwecke Fahrzeuge entwerfen, hat das FZI eine modulare Plattform entwickelt, die höchste Flexibilität für jegliche Szenarien bietet. CoCar NextGen ist mit Hardware der nächsten Generation ausgestattet, die alle zukünftigen Anwendungsfälle berücksichtigt. Seine umfangreiche, redundante Ausstattung ermöglicht unter anderem die Forschung zum Transfer von KI zwischen Sensorsetups. Zusammen mit der Möglichkeit, auf öffentlichen Straßen eingesetzt zu werden, entsteht so eine einzigartige Forschungsplattform, die den Weg zum automatisierten und vernetzten Fahren auf SAE Level 5 ebnet.

Während große Automobilhersteller über die Ressourcen verfügen, mehrere Testflotten für verschiedene Anwendungsbereiche zu betreiben, nutzt das FZI als unabhängige Forschungseinrichtung ein einzelnes Versuchsfahrzeug, um ein breites Spektrum an Forschungsszenarien abzudecken. Deshalb wurde ein Fahrzeug konzipiert, das maximale Flexibilität bietet. Der Fokus lag dabei auf modu-

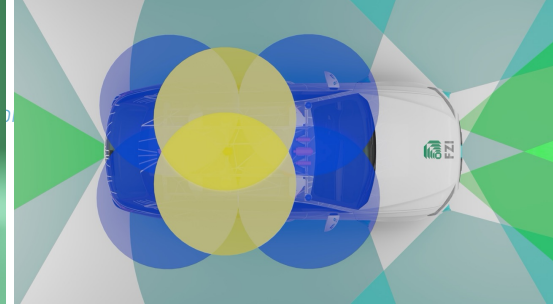
laren und standardisierten Schnittstellen. Zu den Anwendungsfällen, die berücksichtigt wurden, gehören unter anderem: Aufzeichnung von Daten aus der realen Welt, Closed-Loop-Tests von Software für automatisiertes Fahren, die Interaktion mit vernetzter intelligenter Verkehrsinfrastruktur und Studien zu Akzeptanz und Nutzererfahrung.



(a) Sichtfeld der Kameras



(b) Verbauposition der Sensoren



(c) kombiniertes Sichtfeld LiDAR und Radar

Abb. 1: CoCar NextGen verfügt über drei Sensormodalitäten: Kamera (orange), LiDAR (türkis, blau und gelb) sowie Radar (grün). Im linken Bild sind die Sichtkegel der Kameras dargestellt. Rechts sind die Sichtkegel der LiDAR und Radar Sensoren visualisiert. Die Sensoren auf dem Dach (gelb und blau) haben jeweils einen 360°-Sichtbereich.

Die Vielfalt der Anwendungsfälle erfordert eine umfangreiche Hardwareausstattung. Das Fahrzeug ist daher als flexible Plattform für verschiedenste Fragestellungen zukünftiger Forschung zu verstehen. Darüber hinaus ermöglicht der umfassende Aufbau eine einzigartige Möglichkeit zur Untersuchung multimodaler Sensorsetups.

Als Forschungseinrichtung erstreckt sich die Arbeit des FZI auf das gesamte Spektrum der Teilsysteme des autonomen Fahrens, einschließlich Lokalisierung, Umgebungswahrnehmung, Prädiktion von Verkehrsteilnehmern, Vernetzung, Entscheidungsfindung und Regelung. Zudem spielen Querschnittsthemen wie Absicherung, Validierung und Verifikation, Simulation und KI eine wesentliche Rolle. Aus diesem Grund hat das FZI eine große Bandbreite an Anwendungsfällen für dieses Forschungsfahrzeug abzudecken.



Automatisierte Testfahrzeuge bilden eine wichtige Brücke zwischen theoretischer Entwicklung und praktischer Anwendung und bieten eine kontrollierte Umgebung, in der autonome Fahrsysteme rigoros bewertet, verfeinert und validiert werden können.

Die Anwendungsfälle umfassen Aufzeichnungen von Sensordaten, Open-Loop-Tests einzelner Softwarekomponenten und Closed-Loop-Tests von Funktionen unserer Software. Zusätzlich wird kooperatives Fahren mit anderen intelligenten Verkehrsteilnehmern und der smarten Verkehrsinfrastruktur erforscht. Des Weiteren muss die Qualität der Sensoren genügen, um als Referenz für andere Systeme zu dienen. Die Fahrszenarien reichen von dicht besiedelten städtischen Umgebungen über Landstraßen bis hin zu Autobahnfahrten mit hohen Geschwindigkeiten. Darüber hinaus sind auch Anwendungen wie das Parken in Parkhäusern von Bedeutung. Diese Umgebungen erfordern eine vielseitige Sensorausstattung, die sich sowohl durch ihre Reichweite als

auch durch den Umgang mit toten Winkeln und Verdeckungen auszeichnen. Außerdem muss sich das Fahrzeug selbst ohne Satelliten-Signalabdeckung orten können. Das FZI strebt an, diese Szenarien unter allen Umgebungsbedingungen, einschließlich Regen, Nebel und bei Nacht, durchzuführen.

CoCar NextGen wird nicht nur für Sensoraufzeichnungen, sondern auch für die Erprobung und Auswertung für automatisiertes Fahren im öffentlichen Straßenverkehr genutzt. Zu diesem Zweck ist es mit einem Drive-by-Wire-System ausgestattet. Zur Gewährleistung der Sicherheit und Einhaltung der straßenzulassungsrechtlichen Vorgaben ist das Lenksystem mit einer magnetischen Kupplung ausgestattet, die ein Drehmoment von 11 Nm aufbringt. Die Betätigung der Pedale erfolgt über mechanische Aktuatoren, wodurch eine manuelle Übersteuerung jederzeit möglich bleibt. Zusätzlich ermöglicht das System die Steuerung sekundärer Fahrzeugfunktionen wie Blinker, Scheinwerfer, Hupe, Scheibenwischer und Getriebe über den CAN-Bus. Die Regelung des Gesamtsystems erfolgt über eine echtzeitfähige, eingebettete Recheneinheit, die mit dem Drive-by-Wire-System über den CAN-Bus verbunden ist. Das System verfügt über eine Zulassung, die den Einsatz für autonome Erprobungsfahrten im öffentlichen Straßenverkehr in Deutschland erlaubt.

Die von uns eingesetzte Software umfasst sowohl Hochleistungsanwendungen als auch Algorithmen für maschinelles Lernen, (vgl. Ochs u. a., 2024). Außerdem besteht der Software-Stack des FZI aus modularen Paketen, die leicht ausgetauscht werden können. Daher wird eine flexible und leistungsstarke Compute-Plattform benötigt, die in der Lage ist, die eingehenden Sensordaten zu verarbeiten. Der Entwicklungs- und Deploymentprozess zielt auf agile Entwicklungszyklen ab. Oftmals werden Verbesserungen an der Software direkt im Fahrzeug implementiert. Daher sind Komfort, Benutzerfreund-

→ Kontakt

FZI Forschungszentrum Informatik

Haid-und-Neu-Str. 10-14
76131 Karlsruhe

Tel: +49 721 9654-366

Mail: zofka@fzi.de

Web: www.fzi.de



lichkeit und Zugänglichkeit wichtig. Der Schlüsselfaktor ist eine einfach zu bedienende Schnittstelle zur Compute-Plattform und somit für Diagnose des Software-Stacks. Das Ziel war es, ein Fahrzeug zu entwerfen, das alle gegenwärtigen und zukünftigen Forschungsanforderungen so weit wie möglich abdeckt. Daher sollte das Fahrzeug modular aufgebaut sein, so dass zukünftige Hardware leicht hinzugefügt oder aufgerüstet werden kann.

Als Basisfahrzeug wurde ein Audi A6 Plug-In Hybrid gewählt. Es ermöglicht mit seinen mehr als 50 km elektrischer Reichweite emissionsarme Einsätze. Der Audi Avant bietet zudem genug Stauraum für die zusätzlichen Rechnerkomponenten. Der Hochleistungsrechner besteht aus Komponenten aus dem Desktop- und Serverbereich, womit ebenfalls auf Modularität und schneller Integrationsfähigkeit gesetzt wird. Die CPU-Einheiten verfügen über insgesamt 64 Kerne, die für verschiedene Berechnungen genutzt werden können. Zur Ausführung von KI-Algorithmen stehen zudem drei leistungsfähige Grafikkarten zur Verfügung, die eine effiziente Verarbeitung großer Datenmengen ermöglichen.

Um das Sensorsetup für das Fahrzeug zu entwickeln, wurde besonderer Wert darauf gelegt, für jede Sensormodalität eine möglichst umfassende Rundumsicht der Fahrzeugumgebung zu realisieren. Die Sichtfelder der einzelnen Sensoren sind in Abb. 1a und Abb. 1c zu sehen. Die unterschiedlichen Modalitäten ergänzen sich dabei hinsichtlich ihrer individuellen Stärken. Während LiDAR eine direkte und präzise dreidimensionale Darstellung von Objekten ermöglicht, liefern Kamerabilder semantische Informationen sowie eine sehr hohe Auflösung. Radar hingegen erweist sich insbesondere unter schwierigen Umweltbedingungen, wie beispielsweise bei Nebel oder starkem Regen, als äußerst robust. Insgesamt umfasst das Sensorsetup folgende Sensoren:

- 6 × 4D-LiDAR-Scanner (türkis)
- 4 × 360°-LiDAR (blau)
- 2 × Long-Range-360°-LiDAR (gelb)
- 9 × Full-HD-Camera (orange)
- 3 × 4D-Radar (grün)
- 1 × Hochgenaues GNSS-System
- 1 × V2X Onboard Unit mit 5G-Schnittstelle

Abb. 1b zeigt die Anordnung der Sensoren. Der Großteil der Sensoren wurde in eine Dachstruktur integriert, um eine größtmögliche Flexibilität bei Integration zusätzlicher Sensoren oder Sensorupdates zu gewährleisten.

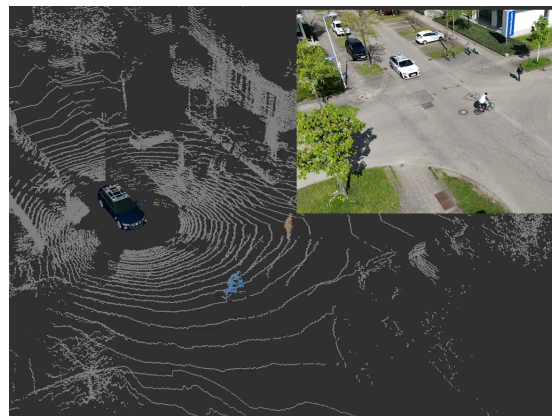


Abb. 2: Verbesserte Umfeldwahrnehmung durch die neue Messtechnik der 4D-LiDAR-Scanner. Sie bieten nicht nur eine 3D-Rekonstruktion der Umwelt, sondern auch Geschwindigkeitsinformation von dynamischen Objekten.

Ein besonders bemerkenswerter Fortschritt in der Sensortechnologie sind die neuartigen 4D-LiDAR-Sensoren. Diese ermöglichen durch die direkte Messung der Radialgeschwindigkeit eine präzisere und umfassendere Erfassung der Umgebung. Beispieldaten der entsprechenden Sensoren sind in Abb. 2 dargestellt. Die zugrundeliegende Technologie basiert auf Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW). Im Gegensatz zu herkömmlichen Impuls-LiDAR-Sensoren, die mit einzelnen Pulsen bei einer bestimmten Frequenz arbeiten, durchläuft ein FMCW-LiDAR während der Abtastung ein vollständiges Frequenzband. Diese Eigenschaft ermöglicht es, für jeden Messpunkt eine direkte Geschwindigkeitsabschätzung vorzunehmen. Insbesondere in komplexen, unübersichtlichen Szenarien erlaubt diese zusätzliche Dimension eine verbesserte Extraktion und Unterscheidung dynamischer Objekte, was die Umgebungswahrnehmung erheblich optimiert.

→ 4D-LiDAR-Systeme

senden ein Signal aus, dessen Frequenz sich ständig ändert. Wird das Signal von einem Objekt reflektiert, entsteht beim Vergleich des empfangenen Signals mit dem ausgesendeten eine Frequenzdifferenz aufgrund des Doppler-Effekts. Diese Differenz verrät, zusätzlich zur Entfernung, wie schnell das Objekt ist.

Das Sensorsetup enthält auch externe Kommunikationskanäle, sodass Informationen mit intelligenter Verkehrsinfrastruktur ausgetauscht werden können (Vehicle-to-X, V2X). Derartige Verkehrsinfrastruktur findet sich unter anderem im Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg (TAF-BW)¹. Das TAF-

¹ taf-bw.de



Abb. 3: CoCar NextGen im Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg (TAF-BW).

BW wurde als praxisnahes Labor für zukünftige Mobilitätskonzepte ins Leben gerufen und wird seit 2016 kontinuierlich weiterentwickelt. Die Kreuzungen im TAF-BW sind mit modernster V2X-Hardware und Sensorik ausgerüstet. Durch den Einsatz von V2X wird ein Echtzeit-Austausch von Informationen zwischen Fahrzeugen, aber auch mit intelligenter Verkehrsinfrastruktur ermöglicht.

MAP-Nachrichten (MAPEM) und Signal-Phase-and-Timing Nachrichten (SPaTEM) werden eingesetzt, um Informationen über Kreuzungen und Ampelanlagen zu empfangen. MAPEM enthalten hierbei Informationen über die Topologie der Kreuzung und bieten die Assoziationsmöglichkeit von Ampel zu Fahrspuren. Über die Zuordnung und die SPaTEM-Nachrichten kann ein vorausschauendes Fahren umgesetzt werden. Intelligente Verkehrsinfrastruktur kann nicht nur die Ampelzustände als Informationsquelle bereitstellen. Erfasste Hindernisse und Verkehrsteilnehmer können über Collective Perception Messages (CPM) bidirektional zwischen dem Software-Stack und der intelligenten Verkehrsinfrastruktur ausgetauscht werden, um das Umgebungsmodell beider Systeme zu erweitern.

CoCarNextGen wird bereits aktiv in vielen öffentlich geförderten Projekten für automatisiertes Fahren eingesetzt. Im Rahmen des Projekts MAD-Urban

wird das Fahrzeug auf dem Joint-Research-Center in Ispra, Italien seine Fähigkeiten unter Beweis stellen. Der Schwerpunkt in MAD-Urban liegt auf dem Austausch von Information zwischen Verkehrsinfrastruktur und automatisierten Fahrzeugen. Darüber hinaus untersucht das Projekt C2CBridge die Kommunikation zwischen mehreren automatisierten Fahrzeugen, zu denen auch CoCar NextGen gehört. Das FZI plant außerdem, einen annotierten Datensatz mit allen verfügbaren Sensoren bereitzustellen. Ein annotierter Ampel датensatz ist bereits öffentlich verfügbar und in Polley u. a., 2025 veröffentlicht. ■

Literaturverweise

- Ochs, Sven u. a. (2024). *One Stack to Rule them All: To Drive Automated Vehicles, and Reach for the 4th level*. URL: <https://arxiv.org/abs/2404.02645>.
- Polley, Rupert u. a. (2025). *The ATLAS of Traffic Lights*. URL: <https://url.fzi.de/atlas>.



In der Rubrik **[FORSCHUNG.KOMPAKT]** stellen wir aktuelle Forschungsergebnisse übersichtlich und frei zugänglich dar, die eine wissenschaftliche Begutachtung (»Peer Review«) durchlaufen haben. Die Originalfassung dieses Artikels wurde veröffentlicht unter **Sielemann, A., Loercher, L., Schumacher, M., Wolf, S., Roschani, M., Ziehn, J., and Beyerer, J. (2024). Synset Signset Germany: A Synthetic Dataset for German Traffic Sign Recognition. In 2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).**, und kann unter der nebenstehenden Adresse abgerufen werden.



<https://synset.de/datasets/synset-signset-ger/>

[FORSCHUNG.KOMPAKT]

Anne Sielemann, Stefan Wolf, Masoud Roschani, Jens Ziehn

Synthetische Daten, die die Realität ersetzen können



Daten sind der Rohstoff, aus dem Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI) erzeugt werden. Über sie werden mit maschinellem Lernen KI-Modelle trainiert, die unterschiedlichste Aufgaben lösen – zum Beispiel die Erkennung von Objekten in Bildern oder die Steuerung von Fahrzeugen. Aber sie sind gleichzeitig ein knapper Rohstoff: Die Erhebung und Aufbereitung von realen Daten ist teuer, langwierig und aufwendig, insbesondere die Annotation der zugehörigen korrekten KI-Ausgabe. Eine Lösung sollen synthetische Daten darstellen, also Daten, die künstlich erzeugt sind, in der Regel über Simulation oder selbst über KI-Modelle. Doch für viele Anwendungen müssen sie zunächst beweisen, dass sie realistisch genug sind, um Realdaten ersetzen zu können. Wie das funktionieren kann, zeigen wir an zwei Beispielen.

Die Bedeutung künstlich erzeugter Daten hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen, aus vielfältigen Gründen. Moderne Verfahren des maschinellen Lernens (ML) und der künstlichen Intelligenz (KI) erfordern immer größere Umfänge an hochwertigen Daten, oft Rohdaten (beispielsweise Bilder) einschließlich sogenannter Annotationen (beispielsweise die im Bild sichtbaren Objekte, ihre Positionen und Umrisse, und Ähnliches).

Für diese fordert der europäische »AI-Act« (dt.: »Verordnung über künstliche Intelligenz«, Europäische Union, 2024), dass »Trainings-, Validierungs- und Testdatensätze, einschließlich [Annotationen],

[...] relevant, hinreichend repräsentativ und so weit wie möglich fehlerfrei und vollständig sein« sollen.

Dieser Anspruch ist in der Praxis oft nur schwer zu erfüllen: Je komplexer die KI-Anwendung, umso mehr Daten sind erforderlich, und umso schwieriger ist es, Annotationen bereitzustellen, die in einem vertretbaren Sinne »fehlerfrei« sind. Ein oft zitiertes Beispiel ist der »Cityscapes«-Datensatz, einer der ersten Datensätze für automatisiertes Fahren, mit denen KI trainiert wurde, in Kamerabildern Fahrzeuge, Fußgänger und befahrbare Straßen zu erkennen (s. Cordts u. a., 2016).

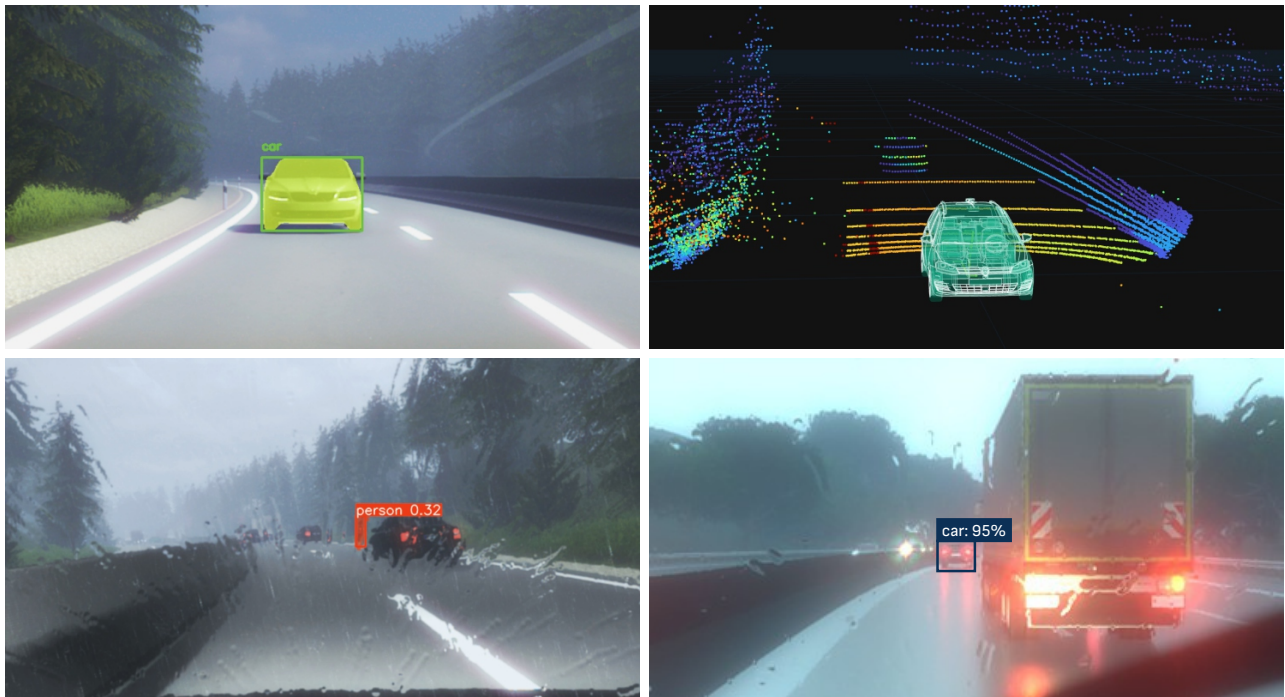


Abb. 1: Synthetische Daten unterschiedlicher Sensoren, wie Kamera und Laserscanner, ermöglichen die Analyse von KI unter schwierigen Bedingungen wie Blendungen oder Regen. (Simuliert in OCTAS®, Abb. oben aus Luettner u. a., 2025).

Der Cityscapes-Datensatz enthält 5 000 Kamerabilder, in denen pixelgenau per Hand annotiert wurde, welche Objektklasse darin zu sehen ist. Die Autoren geben den Annotationsaufwand je Bild, einschließlich Qualitätsprüfung, mit anderthalb Stunden an. Während diese Maßstäbe sicherlich nicht mehr repräsentativ sind, unterstreichen sie doch, dass die Aufwände hochwertiger Annotationen ein erheblicher Faktor der KI-Entwicklung sind.

Auf der Suche nach Sicherheitsgrenzen von KI

Das gilt insbesondere für Daten, die nicht zum *Training* einer KI-Funktion dienen sollen, sondern für den *Test* ihrer korrekten und robusten Funktion: Während viele KI-Funktionen, insbesondere sogenannte »Foundation Models«, die auf immensen Datenmengen trainiert wurden, bereits heute eine sehr hohe Leistungsfähigkeit erbringen, ist es sehr viel aufwendiger, nachzuweisen, dass keine kritischen Schwächen oder Restrisiken verbleiben.

Beispielsweise definiert die Sicherheitsnorm ISO 26262 (»Straßenfahrzeuge – Funktionale Sicherheit«) sogenannte »Automotive Safety Integrity Level« (ASIL). Diese stellen benötigte Sicherheitsniveaus für unterschiedliche Fahrzeugkomponenten dar. Auf dem höchsten Sicherheitsniveau ASIL-D,

auf dem beispielsweise die Fehlauflösung von Airbags oder Lenkeingriffen während der Fahrt abgesichert werden, muss nachgewiesen werden, dass höchstens ein Fehler in 10^8 Betriebsstunden auftreten kann. Übertragen auf komplexe KI-Funktionen bedeutet das, dass auch sehr seltene Szenarien zuverlässig abgedeckt sein müssen.

Eine oft zitierte Beispielrechnung von 2015 (Wachenfeld und Winner, 2015) kommt zu dem Ergebnis, dass »6,62 Milliarden Testkilometer auf der Autobahn absolviert werden [müssten]«, um statistisch nachzuweisen, dass ein Autobahnpilot sicherer fährt als der Mensch. Auch wenn diese Rechenbeispiele schon von den Autoren selbst als theoretisch bezeichnet wurden, und mittlerweile über zehn Jahre alt sind, besteht das Grundproblem weiter: Je leistungsfähiger die KI, umso seltener treten Fehler auf, und umso schwieriger sind sie zu finden.

Auch entstehen herausfordernde Situationen für KI meist nicht durch einzelne Faktoren (beispielsweise grüne Kleidung), sondern durch eine komplexe Kombination (Kleidung, Hintergrund, Umgebungslicht, Bewegungen).

→ Kontakt

Anne Sielemann
Fraunhofer IOSB

Fraunhoferstr. 1
76131 Karlsruhe

Mail: anne.sielemann
@iosb.fraunhofer.de

Web: synset.de



Solche Szenarien in der Realität zu finden, bedeutet erhebliche Aufwände und potenziell auch erhebliche Risiken, denn sie treten oft in Szenarien und Umgebungsbedingungen ein, die auch für menschliche Sicherheitsfahrer schwierig zu beurteilen und beherrschen sind. Zudem bleibt herausfordernd, zu argumentieren, welche Fälle erfolgreich abgedeckt sind, und wo eventuell »blinde Flecken« verbleiben.

Auf der ISO 26262 aufbauend beschreibt deshalb die ISO 21448 (»Straßenfahrzeuge – Sicherheit der Sollfunktion«, s. Schnieder und Hosse, 2019) die Herausforderung sogenannter »unbekannter unsicherer Szenarien«, also Fälle, in denen die KI ein falsches Ergebnis liefert, ohne dass es Entwicklern oder Zulassungsstellen bekannt wäre. Hier verbergen sich erhebliche Risiken für den Betrieb sicherheitskritischer KI-Funktionen.

Künstliche Daten

Hier haben Simulationen ein erhebliches Potenzial: Mit ihrer Hilfe lassen sich im virtuellen Raum »künstliche Daten« erzeugen, die gezielt definierten Parametern entsprechen. Diese Daten können in großer Zahl erzeugt werden, ohne Erhebungen im Realverkehr erforderlich zu machen. Insbesondere für seltene und risikoreiche Szenarien lassen sich auf diesem Weg große Anzahlen mit geringem Aufwand erzeugen. Noch größere Effizienzvorteile haben synthetische Daten in Bezug auf Annotationen. Während in realen Daten erst mit erheblichem, oft manuellem Aufwand sichtbare Objekte und weitere Informationen annotiert werden müssen, erlauben Simulationen, automatisch und meist mit vernachlässigbarem Mehraufwand entsprechende Informationen auszuleiten.

Darüber hinaus ermöglichen Simulationen, gezielt Grenzfälle abzudecken, wie überbelichtete oder verwackelte Bilder, Regen und Nebel, Verschmutzungen, oder Sensoreigenschaften wie Linsenverzeichnungen oder Rauschen, und auf diese Weise technische Parameter zu quantifizieren, ab denen die benötigte Leistung der KI-Modelle unter kritischen Grenzen fällt. Durch die Verbindung mit detaillierten und praktisch fehlerfreien Annotationen lassen sich nicht nur Fehler der KI messen, sondern bereits frühere Auffälligkeiten in ihrer Leistung erkennen, wie ungenauer erkannte Objektumrisse oder Änderungen in den für die Klassifikation betrachteten Bildbereichen.

→ Wie trainiert und getestet man KI richtig?

KI-Verfahren – konkreter: moderne Verfahren des maschinellen Lernens – nutzen Daten um den größten Teil ihrer Funktion zu »erlernen«. Nur ein kleiner Teil ihrer Fähigkeiten entsteht durch gezielt entwickelte Funktionen, das Allermeiste wird über Daten definiert.

Im sogenannten »überwachten Lernen« umfassen Trainingsdaten Datenpunkte, die jeweils aus zwei Teilen bestehen: Einer Eingabe (bspw. das Bild eines Verkehrsschilds) und einer zugehörigen korrekten Ausgabe (bspw. die Klasse »Tempo 30«). Im Training bekommt die KI die Eingabe präsentiert und muss eine Ausgabe erzeugen. Weicht diese von der korrekten Ausgabe ab, bekommt sie »Feedback«, um ihr gelerntes Modell zu verbessern.

Ein häufiges Risiko ist, dass das KI-Modell im Training kein übertragbares Modell erlernt, sondern lediglich die Trainingseingaben und die zugehörigen korrekten Ausgaben auswendig lernt. Man spricht hier von »Overfitting«. Unter anderem deshalb testet man das Trainingsergebnis in der Praxis quasi niemals auf den Trainingsdaten, sondern auf einem separaten Testdatensatz. Dieser sollte aus derselben Quelle stammen wie der Trainingsdatensatz, aber keinen übereinstimmenden Datenpunkt enthalten. Meist entstehen diese Datensätze, indem man einen großen Datensatz erzeugt, und ihn dann (zum Beispiel im Verhältnis 70% : 30%) in Trainings- und Testdaten aufteilt. Man spricht deswegen auch von **Trainings- und Test-Splits**.

Gute Trainings- und Testdaten müssen »i.i.d.« sein: Independent and identically distributed – unabhängige Datensätze, die aber derselben stochastischen Verteilung folgen müssen. Auf diese Weise sind die »Prüfungsfragen« gleichschwer wie die »Übungsfragen«, aber Auswendiglernen hilft nicht weiter. Sind die Trainings- und Testdaten tatsächlich »i.i.d.«, dann ist ein KI-Verfahren genau dann gut auf dem Testdatensatz, wenn es im Training tatsächlich das Prinzip korrekt gelernt und »verstanden« hat.

Entsprechend gilt für den Beitrag: Die Formulierung »Wir trainieren und testen auf demselben Datensatz« meint, dass jeweils die entsprechenden Trainings- und Testsplits genutzt wurden. Oft verfügt ein Datensatz bereits über einen empfohlenen Split. Buchstäblich auf denselben Datenpunkten zu trainieren und zu testen ist im maschinellen Lernen fast immer nur eins: tabu.

Direktvergleich mit Realdatensätzen

Um Eignung künstlicher Daten für Training und Test von KI zu bewerten, muss insbesondere quantitativ bewertet werden, inwieweit diese Daten in der Lage sind, Realdaten zu ersetzen. Da ein solcher Vergleich in umfangreichen Anwendungsfällen komplex ist, wurden KI-Anwendungen in der Mobilität herangezogen, die einen relativ klar abgegrenzten Fokus haben, und es ermöglichen, »synthetische Zwillinge« von realen Datensätzen zu erzeugen, die in statis-



Abb. 2: Vergleich von Bildern des realen CompCars-Datensatzes (oben) mit ähnlichen Bildern des synthetischen Synset®-Boulevard-Datensatzes

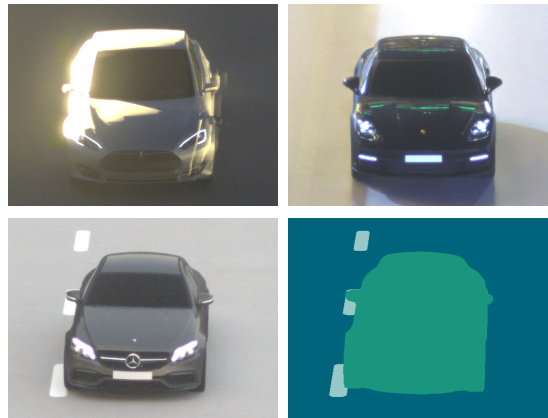


Abb. 3: Beispielbilder einschließlich Annotationsbild im Synset®-Boulevard-Datensatz.

tischen wesentlichen Eigenschaften übereinstimmen sollen, ausdrücklich ohne zu versuchen, konkrete Einzelbilder zu reproduzieren. Ziel ist zu prüfen, ob sich ein konkreter realer Datensatz durch ein künstliches Erzeugungsprinzip ersetzen lässt, aus dem sich prinzipiell beliebig viele Daten zufällig erzeugen lassen.

Diese Beispielanwendungen sind »Vehicle Make and Model Recognition« (VMMR) einerseits, und Verkehrszeichenerkennung andererseits. Die Zielstellung bei VMMR ist es, basierend auf einem Bild eines Fahrzeugs auf dessen Marke und Modell zu schließen, sowie potenziell weitere Informationen wie Baujahr oder Farbe. Der Anwendungsfall ist verbreitet in Verkehrsanalyse und polizeilicher Fahndung, gleichzeitig gibt es nur eine sehr begrenzte Anzahl an öffentlichen Datensätzen. Die Zielstellung bei Verkehrszeichenerkennung ist, wie der Name vermuten lässt, in einem Bildausschnitt, der ein Verkehrszeichen zeigt, die Bedeutung des Verkehrszeichens zu klassifizieren. In beiden Anwendungen ist die Annahme, dass es eine vorab bekannte (oft: sehr große) Anzahl entsprechender »Klassen« gibt, die (wieder-)erkannt werden muss. Trainings- und Testdaten umfassen daher Beispielbilder, geordnet nach den sichtbaren Objektklassen.

Vehicle Make and Model Recognition (VMMR)

Für den Anwendungsfall VMMR wird der CompCars-Datensatz von Yang, Luo u. a. (2015)¹ als Ausgangspunkt genutzt, da es sich hierbei um den größten öffentlich verfügbaren Datensatz handelt, der Fahrzeuge in frontaler Verkehrskamera-Perspektive zeigt. Der basierend darauf erzeugte synthetische Zwilling wurde unter dem Namen »Synset® Boule-

vard« publiziert in Sielemann, Wolf u. a. (2024)², jeweils in Abb. 2.

Synset® Boulevard wurde in der Simulation OCTAS³ erzeugt. Dazu wurden kommerzielle 3D-Modelle von Fahrzeugen aufbereitet, um physikalisch-basiertes Rendering zu ermöglichen und insbesondere die Scheinwerferfunktion abzubilden. Diese Fahrzeuge wurden auf einer vereinfachten mehrspurigen Straße platziert, deren Texturen mit Fahrbahnmarkierungen prozedural zufällig erzeugt wurden. Die Fahrzeuge wurden dann mit zufällig gezogenen Lichtbedingungen, Positionen und Scheinwerferzuständen aus ebenfalls zufällig gezogenen Kamerapositionen abgebildet, wobei Bilder mit dem Cycles-Renderer⁴ berechnet wurden. Anschließend wurden Kameraeffekte wie Linsenreflexe und Überstrahlungen simuliert. Zudem liegt jedem Bild ein Annotationsbild bei (s. Abb. 3), das den Umriss des Fahrzeugs im Bild sowie die Lage und den Typ von sichtbaren Fahrbahnmarkierungen angibt.

Der reale CompCars-Datensatz (genauer gesagt dessen Teildatensatz für Verkehrskameras) umfasst 50 000 Bilder über 281 unterschiedliche Fahrzeugmarken, -modelle und -baujahre, die bis 2014 in China erhoben wurden. Die Anzahl der Fahrzeuge je Klasse variiert, es sind ferner eine Reihe an bekannten menschlichen Fehlern in der Annotation enthalten (vgl. Sánchez, Parra u. a. (2021)); ferner ist zu berücksichtigen, dass asiatische Fahrzeuge überwiegen, die in Europa mitunter seltener oder in optisch leicht anderen Varianten anzutreffen sind.

Der synthetische Synset®-Boulevard-Datensatz umfasst 32 400 Bilder (jeweils noch einmal für vier unterschiedliche Kamerasimulationen) über 162

¹ mmlab.ie.cuhk.edu.hk/datasets/comp_cars/

² synset.de/datasets/synset-blvd/

³ octas.org

⁴ cycles-renderer.org

Tab. 1: Die wichtigsten öffentlich verfügbaren Datensätze für VMMR in Verkehrskameras.

Datensatz und Publikation	Anzahl Bilder	Anzahl Klassen	real/synth.	Perspektive
CompCars, Yang, Luo u. a. (2015)	50 000	281	real	frontal
BoxCars21k, Sochor, Herout und Havel (2016)	63 750	148	real	gemischt
BoxCars116k, Sochor, Špaňhel und Herout (2018)	116 286	693	real	gemischt
Synset® Boulevard, Sielemann, Wolf u. a. (2024)	32 400	162	synth.	frontal

Tab. 2: Untersuchung von Trainingsvorgängen eines ConvNeXt-Small-Modells, trainiert auf Synset® Boulevard und getestet auf dem realen CompCars-Datensatz, zunächst für alle übereinstimmenden Modelle, dann eingegrenzt auf die Teile, in denen das Modelljahr (»Jhr.«) oder sogar der genaue Facelift (»Fcl.«) übereinstimmen. Bei maximaler Übereinstimmung erreichen sowohl synthetische wie auch echte Trainingsdaten ein Testergebnis von 100%.

Jhr.	Fcl.	F ₁ SS Blvd.	F ₁ CompCars	Anz. Modelle
✗	✗	50,3	97,4	51
✓	✗	93,5	100,0	21
✓	✓	100,0	100,0	12

Klassen, die jeweils durchgängig in 200 Bildern abgedeckt sind. Synset® Boulevard fokussiert darauf, insbesondere auch aktuellere und europäische Marken (neuestes Baujahr 2022) abzudecken. Zudem beinhaltet Synset® Boulevard eine stärkere Variation von Lichtverhältnissen und Kamerawinkeln als der CompCars-Datensatz.

Die Datensätze unterscheiden sich ferner dadurch, dass CompCars in derselben Klasse zum Teil unterschiedliche Baujahre und Facelifts kombiniert, wohingegen Synset® Boulevard innerhalb einer Klasse strikt eine einzige Fahrzeugvariante enthält.

Um zu messen, wie gut die synthetischen Daten reale Daten ersetzen können, wurden neuronale Netze auf den synthetischen Synset®-Daten trainiert und auf den realen CompCars-Daten getestet. Das dabei erzielte Ergebnis wurde verglichen mit der Leistung, die neuronale Netze erzielen, wenn sie direkt auf dem realen CompCars-Datensatz trainiert werden. Die Ergebnisse zeigt Tab. 2 für ein KI-Modell vom Typ ConvNeXt-Small Liu, Mao, Wu u. a., 2022. Da CompCars keine jahres- und Facelift-genauen Klassen beinhaltet, wurde neben dem Vergleich aller übereinstimmenden Modelle der CompCars-Datensatz ferner eingegrenzt auf Teile, in denen das Modelljahr (»Jhr.«) oder sogar der genaue Facelift (»Fcl.«) übereinstimmen.

Angegeben ist der F₁-Score bei Training auf dem jeweiligen Datensatz und Test auf CompCars, als gängiges Maß in der Bewertung der Klassifikationsleistung von maschinellen Lernverfahren, wobei ein F₁-

Score von 100% eine fehlerfreie Klassifikation anzeigt. Es zeigt sich, dass das Trainingsergebnis auf synthetischen Daten zunächst wesentlich schlechter ist als auf den Realdaten, wenn man Klassen in CompCars aufnimmt, die eine große Mischung von Jahren und Facelifts beinhalten. Schränkt man die Daten jedoch ein, sodass auch CompCars nur präzise Jahre bzw. Facelifts beinhaltet, steigt die Ergebnisqualität erheblich. Bei maximaler Vergleichbarkeit verbleiben lediglich 12 übereinstimmende Modelle – für diese führt ein Training auf rein synthetischen Daten aber zu fehlerfreien Testergebnissen auf Realdaten, ebenso wie wenn das KI-Modell direkt auf Realdaten trainiert wird.

Ein differenzierterer Vergleich ist anhand der verfügbaren Daten in diesem Anwendungsfall nicht möglich, da sowohl die realen wie auch die synthetischen Daten die maximal mögliche Leistung von 100% erreichen.

Verkehrszeichenerkennung

Für den Anwendungsfall der Verkehrszeichenerkennung dient der reale deutsche GTSRB-Datensatz (»German Traffic Sign Recognition Benchmark«, veröffentlicht in Stallkamp u. a., 2011)⁵ als Ausgangspunkt, der 51 882 Bilder über 43 deutsche Verkehrszeichensklassen umfasst. Im Gegensatz zum VMMR-Anwendungsfall gibt es für Verkehrsschildklassifikation deutlich mehr öffentlich verfügbare Datensätze (s. Tab. 3), darunter auch der CATERED-Datensatz (veröffentlicht in Siniosoglou, Sarigiannidis u. a., 2021), der bereits einen synthetischen Zwilling von GTSRB darstellt. Für die Untersuchung erzeugen wir einen weiteren Datensatz, Synset® Signset Germany (veröffentlicht in Sielemann, Loercher u. a., 2024)⁶.

Der synthetische CATERED-Datensatz umfasst 94 478 Bilder über dieselben 43 Klassen wie GTSRB, während Synset® Signset 105 500 enthält, die sich aber über insgesamt 211 Klassen verteilen (mit jeweils 500 Bildern pro Klasse); die ursprünglichen 43 Klassen aus GTSRB sind vollständig als Teildatensatz enthalten (s. Abb. 4).

⁵ benchmark.ini.rub.de

⁶ synset.de/datasets/synset-signset-ger/



Abb. 4: Überblick über die Klassen in Synset® Signset Germany. Die erste Zeile zu 43 Zeichen entspricht den Klassen im realen GTSRB-Datensatz.

Tab. 3: Die wichtigsten öffentlich verfügbaren Datensätze für Verkehrszeichenerkennung (nach Datum sortiert).

Datensatz und Publikation	Anzahl Bilder	Anzahl Klassen	Ø Bilder/Klasse	real/synth.	Region
MASTIF, Šegvić u. a. (2010)	6 428	94	68	real	HRV
MASTIF, Šegvić u. a. (2010)	5 215	86	61	real	HRV
Stereopolis, Belaroussi u. a. (2010)	251	10	25	real	FRA
MASTIF, Šegvić u. a. (2010)	1 473	51	29	real	HRV
STS (set 1&2), Larsson und Felsberg (2011)	6 652	19	350	real	SWE
GTSRB, Stallkamp u. a. (2011)	51 882	43	1 207	real	DEU
LISA, Mogelmose, Trivedi und Moeslund (2012)	7 855	49	160	real	USA
BTSC, Mathias u. a. (2013)	7 125	62	115	real	BEL
TT100K, Zhu u. a. (2016)	30 000	221	136	real	CHN
CURE-TSR, Temel u. a. (2017)	2 206 106	14	157 579	mixed	BEL
TSRD, Huang (2018)	6 164	58	106	real	CHN
European DS, Serna und Ruichek (2018)	82 476	164	503	real	EUR
DFG, Tabernik und Skočaj (2019)	17 598	200	88	real	SVN
voll annot. MTSD, Ertler u. a. (2020)	257 541	400	644	real	weltweit
teilw. annot. MTSD, Ertler u. a. (2020)	96 613	400	242	real	weltweit
CATERED Siniosoglou, Sarigiannidis u. a. (2021)	94 478	43	2 197	synth.	DEU
Synset® Signset, Sielemann, Loercher u. a. (2024)	105 500	211	500	synth.	DEU

Die Erzeugung des Synset®-Signset-Germany-Datensatzes ähnelt der Erzeugung von Synset®-Boulevard, weicht aber in wesentlichen Punkten davon ab, wie in Abb. 6 gezeigt. Auch Synset® Signset wird in OCTAS® über physikalisch-basiertes Rendering erzeugt; allerdings wurden die Schilder-Klassen nicht über kommerzielle 3D-Modelle erzeugt, sondern basierend auf den offenen Daten der Wikipedia.⁷

Die dortigen »idealen« Bilder müssen anschließend an das reale Erscheinungsbild im Verkehr angepasst werden, wozu Verfärbungen, Abnutzungen und Vandalismus (insbesondere das Anbringen von Aufklebern) gehört. Zu diesem Zweck wurden beim Tiefbauamt in Karlsruhe über 200 ausgemusterte Verkehrsschilder abfotografiert. Für jedes Foto eines entsprechend verschmutzten Schildes wurde teilautomatisiert eine idealisierte Fassung wiederhergestellt, wie das Schild in etwa auf Wikipedia aussehen würde. Zudem wurde eine Maske mit Schmutz- und Kratzerpositionen erzeugt. Basierend darauf wurde ein generatives KI-Modell trainiert (das Generative Adversarial Network Pix2Pix, Isola u. a., 2017), das die umgekehrte Transformation erlernte: Die Umwandlung eines idealen Bildes von Wikipe-

dia, zusammen mit einer Schadensmaske, hin zu einem entsprechend verschmutzten und zerkratzten Schild, das anschließend als realitätsnahe Textur für das Rendering genutzt werden konnte. Um unabhängig von der Größe und Form der einzelnen Schilder zu sein, wurde das generative KI-Modell nicht auf gesamten Schildern trainiert, sondern auf 256×256 Pixeln großen Ausschnitten.

In der Datensatzerzeugung wird dies eingesetzt, indem zuerst prozedural (das heißt, über ein klassisches Rechenmodell) eine Schadensmaske erzeugt wird, die mit dem idealen Wikipedia-Bild verbunden wird. Anschließend übersetzt das generative KI-Modell dies zu einer Schildtextur, wodurch jedes Bild im Datensatz ein anderes Muster aus Kratzern und Verschmutzungen aufweist. Die Haupt-Schilderklassen werden zufällig mit weiteren, jeweils passenden Zusatzschildern verbunden (beispielsweise der Einschränkung der Geschwindigkeitsbegrenzung auf Nässe), und auf vertikalen oder horizontalen Masten platziert.

Anschließend werden diese 3D-Szenen wieder, wie in Synset® Boulevard, zu physikalisch-basierten Kamerabildern umgewandelt, einerseits über Raytracing mit dem Cycles-Renderer, andererseits über

⁷ de.wikipedia.org/wiki/Bildtafel_der_Verkehrszeichen_in_der_Bundesrepublik_Deutschland_seit_2017



Abb. 5: Vergleich von Bildern des realen GTSRB-Datensatzes (oben) mit ähnlichen Bildern des synthetischen CATERED-Datensatzes (mitte), sowie des neu erzeugten synthetischen Synset®-Boulevard-Datensatzes (unten).

Rasterisierung mit dem Ogre3D-Renderer.⁸ Im Vergleich zu Synset® Boulevard werden in Synset® Signset noch weitere Abbildungsartefakte aufgenommen, darunter Verwacklungen und chromatische Aberrationen, da diese im Originaldatensatz GTSRB deutlich ausgeprägter zu beobachten waren. Alle Parameter, wie Lichtverhältnisse, Kamerawinkel oder Verwacklungen werden über Wahrscheinlichkeitsverteilungen gezogen, sodass der gesamte Datensatz explizit beschriebenen stochastischen Eigenschaften folgt. Die gewählten Parameter je Einzelbild werden in Annotationsdateien bereitgestellt.

Die Ergebnisse beim Training eines KI-Modells sind in Tab. 4 dargestellt. Die erste und wenig überraschende Erkenntnis aus der Tabelle ist, dass das neuronale Netzwerk immer die besten Ergebnisse erzielt, wenn es auf einem Datensatz getestet wird, auf dem es auch trainiert wurde. Das Training mit dem synthetischen Synset®-Signset-Datensatz erzielt jedoch durchgängig die zweitbesten Ergebnisse.

Schlechter schneidet der synthetische CATERED-Datensatz ab: Während dieser als Trainingsdatensatz beim Testen mit dem realen GTSRB-Datensatz nur eine Genauigkeit von 76,4% erreicht, erzielt Synset® Signset 98,5% (während GTSRB auf sich selbst trainiert 99,9% erreicht).

Doch nicht nur der Realismusgrad lässt sich so abschätzen, auch die Frage, welcher Datensatz herausfordernd genug ist, um ein robustes KI-Modell zu trainieren. Während Training mit Synset® eine Ge-

Tab. 4: Klassifikationsgenauigkeit von ConvNeXt-Small-Modellen, jeweils auf einem der drei Datensätzen trainiert, und anschließend auf allen drei Datensätzen für Verkehrszeichenerkennung getestet.

Training ↓	Test →	S. Signset	GTSRB	CATERED
Synset® Signset		99,5%	98,3%	84,4%
GTSRB		89,4%	99,9%	77,1%
CATERED		50,0%	76,4%	86,1%

nauigkeit von rund 98% beim Test GTSRB liefert, trifft das Gegenteil nicht zu: Ein auf GTSRB trainiertes Netz erreicht eine Genauigkeit von unter 90%, wenn es mit Synset® getestet wird. Dies deutet darauf hin, dass Synset® tatsächlich der schwierigere Datensatz ist und wohl eine stärkere Generalisierung fördert, ohne dass die Anwendbarkeit auf das einfachere GTSRB nennenswert beeinträchtigt wird.

Und obwohl CATERED erkennbar stark von GTSRB und Synset® Signset abweicht, kann ein Netz mithilfe von Synset® Signset trainiert werden, um zu eine Genauigkeit von ca. 84% auf CATERED zu erreichen – wohingegen das Training auf dem realen GTSRB-Datensatz nur eine Genauigkeit von ca. 77% auf CATERED erreicht. Auch das unterstreicht, dass Synset® Signset ein robustes Trainingsergebnis und gute Generalisierungsfähigkeit erreicht.

Mehr als nur ein Ersatz für Realdaten

Die Ergebnisse zeigen, dass der erreichte Realismusgrad der synthetischen Daten es ermöglicht, reale Daten adäquat zu ersetzen, was die Voraussetzung für alle weiteren Verwendungen synthetischer Daten ist. Wie eingangs angedeutet, erlauben synthetische Daten aber nicht nur das kostengünstige Ersetzen von Realdaten – sie können auch Untersuchungen ermöglichen, die mit Realdaten nahezu unmöglich wären.

Beispielhaft wurde ein weiterer Datensatz erzeugt, der dasselbe Erzeugungsprinzip wie Synset® Signset Germany nutzt, aber gezielte einzelne Variationen beinhaltet (veröffentlicht in Sielemann, Barner u. a., 2025).⁹ Dazu wurde der Datensatz auf 82 Klassen eingeschränkt, die nach Form (rund, dreieckig, rechteckig, sonstige) und nach üblichem Auftretensort (innerorts, außerorts, gemischt) gruppiert sind. Basierend darauf wurden sechs Datensätze über je 90 200 Bilder erzeugt (541 200 insgesamt), nach den folgenden Prinzipien:

⁸ ogre3d.org

⁹ synset.de/datasets/synset-signset-ger/background-effect

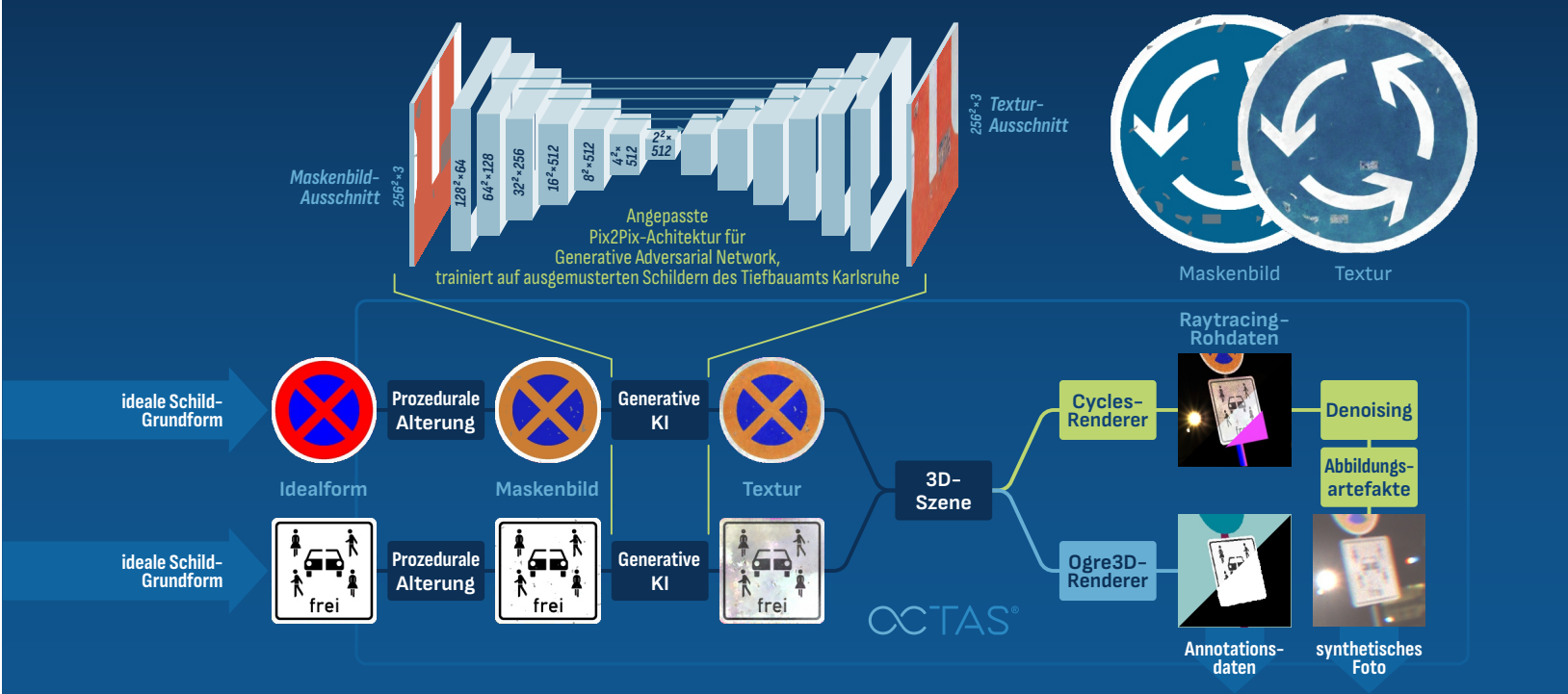


Abb. 6: Überblick über die Erzeugungspipeline für Verkehrsschilder, die in der KAMO-Simulationsplattform OCTAS® aufgebaut wurde. Die Verarbeitungskette verbindet generative KI mit analytischen, physikalisch basierten Modellen – KI, um komplexe und chaotische Effekte wie die Alterung und Verschmutzung von Verkehrsschildern abzubilden, physikalisch-basierte Modelle hingegen, um klar beschreibbare optische Phänomene darzustellen, wie Überbelichtung, Brechungs- und Beugungseffekte oder Rauschen. Beide Ansätze sind kontrollierbar und auf realen Daten basierend umgesetzt, sodass für gezielt für realitätsnahe Szenarien Daten erzeugt werden können.

- Jeder Datensatz enthält exakt dieselbe Abfolge von Schildern
- Drei Datensätze (die Hälfte) stellen jedes Schild in seiner üblichen Umgebung dar: Innerorts-Schilder vor urbanen Umgebungen, Außerorts-Schilder vor ländlichen Umgebungen. Die anderen drei Datensätze variieren die Umgebungen völlig zufällig, ohne Bezug zum Schildinhalt.
- Die jeweiligen drei Datensätze wiederum sind exakt übereinstimmend bis auf den Betrachtungswinkel des Schildes: Ein Datensatz enthält die Schilder strikt frontal und mittig, ein Datensatz variiert den Winkel leicht, und ein Datensatz variiert den Winkel extrem.

So entstehen Datensätze, die sich gezielt in genau einem Merkmal unterscheiden, und ansonsten identisch sind. In Sielemann, Barner u. a., 2025 wird dies genutzt, um eine gängige Annahme aus dem Bereich der erklärbaren KI (XAI, »explainable AI«) zu widerlegen. Ein gängiger Ansatz der XAI besteht darin, für ein neuronales Netz zu berechnen, welche Bildbereiche einen positiven (bestärkenden) oder negativen (abschwächenden) Einfluss auf die korrekte Klassifikation haben. Dazu dient beispielsweise die Berechnung sogenannter Kernel-SHAP-Werte (Lundberg, 2017), bei denen Bildausschnitte zwischen -1 und +1 bewertet werden, je nachdem, ob sie eher *gegen* oder *für* die erkannte Klasse sprechen.

Unter der Annahme, dass ein robustes, gut trainiertes neuronales Netz nur auf das Schild selbst

»schaut«, um es zu klassifizieren, und den Hintergrund ignoriert, wird ein sogenannter »Pixel-Ratio« berechnet: Das Verhältnis zwischen positiven Aufmerksamkeiten innerhalb des Objektrisses (des Schildes) und den gesamten positiven Aufmerksamkeiten (einschließlich des Hintergrunds). Ist dieses Verhältnis groß, hat das Netzwerk bei der Klassifikation vor allem auf den Schildinhalt geachtet. Ist es klein, hat das Netzwerk stark den Hintergrund berücksichtigt. Der Annahme zufolge ist ein hoher Pixel-Ratio also ein Zeichen für ein gesundes, gut funktionierendes neuronales Netz; ein niedriger Pixel-Ratio hingegen ein Anzeichen, dass das Netz nicht wirklich »verstanden« hat, was die Aufgabe ist.

Die Untersuchungen in Sielemann, Barner u. a., 2025 allerdings widerlegen diese gängige Interpretation von Kernel-SHAP und Pixel-Ratio. Die Publikation zeigt, dass neuronale Netze unterschiedliche Gründe haben können, auch auf den Hintergrund zu achten. Bei starken Kameravariationen nimmt die Aufmerksamkeit auf den Hintergrund zu, mutmaßlich um zwischen Hintergrund und Schild zu unterscheiden und so den eigentlichen Schildinhalt überhaupt zu finden. Ebenso nimmt die Aufmerksamkeit zu, wenn der Hintergrund tatsächlich Nutzinformation enthält. Ein verwackeltes Schild, das Tempo 30 oder Tempo 80 zeigen könnte, kann potenziell eingegrenzt werden danach, ob es sich in einer städtischen oder in einer Überland-Umgebung befindet. In beiden Fällen lässt die Klassifikationsgüte trotz sinkendem Pixel-Ratio nicht nach.



Abb. 7: Synthetische Daten erlauben gezielte Variationen, die in Realität unmöglich sind: Die Abbildung zeigt für zwei Verkehrsschildklassen jeweils das erste Bild der sechs Teildatensätze im Synset®-Signset-Variationsdatensatz. Das identische Schild mit identischen Kratzern erscheint in drei verschiedenen Winkeln und in zwei verschiedenen Umgebungen, und erlaubt so gezielte Analysen, wie Kontext das Training von neuronalen Netzen beeinflusst.

Das zeigt, dass die Interpretation des Pixel-Ratio für erklärbare KI zumindest komplizierter ist, als bisweilen angenommen. Ein solch gezielter Test einzelner Einflussfaktoren wäre mit Realdaten kaum durchführbar gewesen, zudem bringen synthetische Daten für den Anwendungsfall noch weitere nützliche Eigenschaften ein: Die Annotation, wo sich das Schild im Bild befindet, kann automatisch mit erzeugt werden, und durch das stochastisch-basierte Erzeugungsprinzip lässt sich mathematisch definieren, welche Korrelationen zwischen Trainings- und Testdatensatz überhaupt existieren können. So können neuronale Netze nicht von Korrelationen zwischen Trainings- und Testdaten profitieren, die nicht ausdrücklich bezweckt sind. Das ist ein wichtiger Baustein für die Belastbarkeit der Ergebnisse.

Fazit

Die beschriebenen Ansätze zeigen nicht nur, dass simulierte Daten in der Lage sind, reale Daten zu ersetzen, sondern insbesondere auch, wie man ihre Eignung quantifizieren kann. Dabei ist das Trainieren auf synthetischen Daten und das Testen auf realen



Abb. 8: Der »Pixel-Ratio« errechnet sich durch die positiven Kernel-SHAP-Werte innerhalb der Schildfläche, geteilt durch die Summe aller positiven Kernel-SHAP-Werte im Bild. Er misst intuitiv, wie relevant der Schildinhalt für die Klassifikation war, im Vergleich zum Hintergrund.

Daten nur ein erster Schritt. Es zeigt sich, dass synthetische Daten auch weitere Zielvorgaben erfüllen können – insbesondere, anspruchsvollere Fälle abzudecken, und damit robustere KI zu trainieren.

Darüber hinaus bieten synthetische Daten aber auch eine Chance, nicht nur bessere KI-Modelle zu trainieren, sondern KI besser zu verstehen. Durch Simulationen lassen sich gezielt »Paralleluniversen« aufbauen, deren Eigenschaften vollständig bekannt sind, und wo es somit – im Gegensatz zur realen Welt – immer eine richtige und eine falsche Lösung oder Schlussfolgerung gibt. Über solche Datensätze lassen sich dann gezielt beispielsweise Methoden der erklärbaren KI untersuchen. ■

Literaturverweise

- Belaroussi, Rachid u. a. (2010). »Road sign detection in images: A case study«. In: *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*. IEEE.
- Cordts, Marius u. a. (2016). »The Cityscapes Dataset for Semantic Urban Scene Understanding«. In: *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- Ertler, Christian u. a. (2020). »Traffic Sign Detection and Classification around the World«. In: *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*.
- Europäische Union (Juli 2024). *Verordnung (EU) 2024/1689 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für künstliche Intelligenz und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 300/2008, [...] und (EU) 2020/1828 (Verordnung über künstliche Intelligenz)*.

- Huang, LinLin (2018). *Chinese Traffic Sign Database*. <https://nlpr.ia.ac.cn/pal/trafficdata/recognition.html>.
- Isola, Phillip u. a. (2017). »Image-to-image translation with conditional adversarial networks«. In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, S. 1125–1134.
- Larsson, Fredrik und Michael Felsberg (2011). »Using Fourier descriptors and spatial models for traffic sign recognition«. In: *Image Analysis: 17th Scandinavian Conference, SCIA 2011, Ystad, Sweden, May 2011. Proceedings 17*. Springer, S. 238–249.
- Liu, Zhuang, Hanzi Mao, Chao-Yuan Wu u. a. (Juni 2022). »A ConvNet for the 2020s«. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Feichtenhofer, Christoph and Darrell, Trevor and Xie, Saining.
- Luettner, Florian u. a. (2025). »From Real-World Traffic Data to Relevant Critical Scenarios«. In: *Proceedings of the 2025 IEEE International Automated Vehicle Validation Conference (IAVVC)*. IEEE.
- Lundberg, Scott (2017). »A unified approach to interpreting model predictions«. In: *arXiv preprint arXiv:1705.07874*.
- Mathias, Markus u. a. (2013). »Traffic sign recognition—How far are we from the solution?«. In: *The 2013 international joint conference on Neural networks (IJCNN)*. IEEE.
- Mogelmoose, Andreas, Mohan Manubhai Trivedi und Thomas B Moeslund (2012). »Vision-based traffic sign detection and analysis for intelligent driver assistance systems: Perspectives and survey«. In: *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 13.4, S. 1484–1497.
- Sánchez, Héctor Corrales, Noelia Hernández Parra u. a. (2021). »Are We Ready for Accurate and Unbiased Fine-Grained Vehicle Classification in Realistic Environments?«. In: *IEEE Access* 9. Alonso, Ignacio Parra and Nebot, Eduardo and Fernández-Llorca, David, S. 116338–116355. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3104340.
- Schnieder, Lars und René S Hosse (2019). *Leitfaden Safety of the Intended Functionality*. Springer.
- Šegvić, S u. a. (2010). »A computer vision assisted geoinformation inventory for traffic infrastructure«. In: *13th international IEEE conference on intelligent transportation systems*. IEEE, S. 66–73.
- Serna, Citlalli Gamez und Yassine Ruichek (2018). »Classification of traffic signs: The european dataset«. In: *IEEE Access* 6, S. 78136–78148.
- Sielemann, Anne, Valentin Barner u. a. (2025). »Measuring the Effect of Background on Classification and Feature Importance in Deep Learning for AV Perception«. In: *Proceedings of the 2025 IEEE International Automated Vehicle Validation Conference (IAVVC)*. IEEE.
- Sielemann, Anne, Lena Loercher u. a. (2024). »Synset Signset Germany: a Synthetic Dataset for German Traffic Sign Recognition«. In: *2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, S. 3383–3390.
- Sielemann, Anne, Stefan Wolf u. a. (2024). »Synset Boulevard: A Synthetic Image Dataset for VMAR«. In: *2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, S. 9146–9153.
- Siniosoglou, Ilias, Panagiotis Sarigiannidis u. a. (2021). »Synthetic Traffic Signs Dataset for Traffic Sign Detection & Recognition In Distributed Smart Systems«. In: *2021 17th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. IEEE, S. 302–308.
- Sochor, Jakub, Adam Herout und Jiri Havel (Juni 2016). »BoxCars: 3D Boxes as CNN Input for Improved Fine-Grained Vehicle Recognition«. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- Sochor, Jakub, Jakub Špaňhel und Adam Herout (2018). »Boxcars: Improving fine-grained recognition of vehicles using 3-d bounding boxes in traffic surveillance«. In: *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 20.1, S. 97–108.
- Stallkamp, Johannes u. a. (2011). »The German traffic sign recognition benchmark: a multi-class classification competition«. In: *The 2011 international joint conference on neural networks*. IEEE.
- Tabernik, Domen und Danijel Skočaj (2019). »Deep Learning for Large-Scale Traffic-Sign Detection and Recognition«. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. ISSN: 1524-9050. doi: 10.1109/TITS.2019.2913588.
- Temel, D. u. a. (2017). »CURE-TSR: Challenging unreal and real environments for traffic sign recognition«. In: *Neural Information Processing Systems (NeurIPS) Workshop on Machine Learning for Intelligent Transportation Systems*.
- Wachenfeld, Walther und Hermann Winner (2015). »Die Freigabe des autonomen Fahrens«. In: *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*, S. 439–464.
- Yang, Linjie, Ping Luo u. a. (Juni 2015). »A Large-Scale Car Dataset for Fine-Grained Categorization and Verification«. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Change Loy, Chen and Tang, Xiaoou.
- Zhu, Zhe u. a. (Juni 2016). »Traffic-Sign Detection and Classification in the Wild«. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.

[ZAHLEN.DATEN]

Matthias Teichmann¹, Ralf Ihrig¹, Liss Böckler², Marvin Baumann³, Martin Kagerbauer³, Christian Klinkhardt³, Lucas Schuhmacher³, Sofie Ehrhardt⁴, Rico Auerswald⁵, Mirjam Fehling-Kaschek⁶, Florian Lüttner⁶, Jonas Schulze⁸, Klaus Bengler⁸, Jens Ziehn⁷

Was fehlt zur flächendeckenden Automatisierung im ÖPNV?



Automatisierte Shuttlebusse im ÖPNV gelten als wesentlicher Baustein für die urbane Mobilität der Zukunft. Doch trotz umfangreicher Pilotprojekte steht die flächendeckende Einführung vor wesentlichen Hürden. Im Rahmen der Vorbereitung eines Forschungsprojekts wurde differenziert unter Expertinnen und Experten erhoben, wo die Umsetzung derzeit noch auf Herausforderungen stößt.

Einleitung

Automatisierter öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) soll in den kommenden Jahren in Deutschland Realität werden. Das meint konkret den Betrieb mit automatisierten Fahrzeugen, die keine menschliche Überwachung im Fahrzeug mehr benötigen, sondern höchstens die Unterstützung einer externen Leitstelle beziehungsweise einer »technischen Aufsicht« erfordern. Die Dringlichkeit ist hoch:

Der ÖPNV leidet bereits heute unter Personalknappheit, und in den kommenden Jahren wird sich der Fachkräftemangel weiter verschärfen. Gleichzeitig sollen im Zuge der Mobilitätswende Menschen zunehmend auf das private Auto verzichten und auf den nachhaltigeren öffentlichen Verkehr (ÖV) umsteigen (siehe u.a. auch Doll u.a., 2025). So ist das Thema sowohl Gegenstand der Strategie der vorherigen Bundesregierung für autonomes Fahren im Straßenverkehr (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2024), wie auch des Koalitionsver-

→ Kontakt

¹ schwarzenberg.tech GmbH, matthias@schwarzenberg.tech

² Interlink GmbH

³ Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

⁴ FZI Forschungszentrum Informatik

⁵ Fraunhofer IVI

⁶ Fraunhofer EMI

⁷ Fraunhofer IOSB

⁸ TU München

trages der neuen Bundesregierung (CDU, CSU und SPD, 2025).



Wir werden die Voraussetzungen dafür schaffen, dass autonomes Fahren in den Regelbetrieb kommt.«

Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD

Hoch- oder vollautomatisiertes Fahren im ÖV, insbesondere im ÖPNV, bietet ein hohes Potenzial zur Effizienzsteigerung und Angebotsverbesserung – etwa durch flexible, bedarfsorientierte Betriebskonzepte, erweiterte Betriebszeiten und den Einsatz in bisher wenig angebundenen Gebieten.

Auch heute sind bereits automatisierte Shuttlebusse im Testbetrieb unterwegs. Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) führt auf seiner Seite¹ über 40 Pilotprojekte zum automatisierten Shuttlebus-Betrieb in Deutschland auf (vgl. Abb. 2). Jedoch benötigen diese Fahrzeuge noch menschliche Sicherheitsfahrerinnen oder -fahrer im Fahrzeug, die das System überwachen und notfalls eingreifen. Ein solcher Betrieb ermöglicht die Erprobung wichtiger technischer Funktionen – Personalengpässe werden dadurch aber nicht aufgelöst.

Das kann erst geschehen, wenn die menschliche Aufsicht nicht mehr durchgängig im Fahrzeug anwesend sein muss, sondern das Fahrzeug auch au-

¹ [vdv.de/liste-autonome-shuttle-bus-projekte.aspx](https://www.vdv.de/liste-autonome-shuttle-bus-projekte.aspx)

					
Automatisierungsstufe	1	2	3	4	5
Lenkung / Gas&Brems	entweder / oder		beides vollständig automatisiert		
menschliche Aufsicht	durchgängig		nach Warnung	unkritisch	nie nötig
Betriebsbereich	beschränkt				unbeschränkt
deutscher Rechtsrahmen	✓				✗

Abb. 1: Überblick über die fünf Stufen der Automatisierung nach VDA / SAE. Derzeitiger Fokus der Entwicklungen liegt insbesondere auf dem Erreichen von Stufe 4, wo die menschliche Aufsicht im Fahrzeug entfallen kann, und unkritische betriebliche Sonderfälle auch von einer von Ferne zugeschalteten technischen Aufsicht (TA) übernommen werden können. Bis Stufe 5 bleiben die Systeme aber begrenzt auf definierte Betriebsbereiche, angedeutet durch das Symbol der Faltkarte. Erst ab Stufe 5 sollen Systeme ohne Beschränkungen »überall« einsatzfähig sein.

Bergewöhnliche Situationen vollständig selbst auflösen kann, und nur noch in weniger kritischen Fällen externe Unterstützung anfordern muss. Als Zielbild gemäß des deutschen Rechtsrahmens soll eine technische Aufsicht mehrere Fahrzeuge gleichzeitig betreuen können.

Um die Fähigkeiten solcher automatisierter Systeme zu strukturieren, werden diese in sogenannte »Stufen der Automatisierung« nach VDA und SAE eingeteilt (s. Abb. 1, sowie SAE International, 2016). Bis zu Stufe 3 muss eine menschliche Aufsicht durchgängig im Fahrzeug verfügbar sein, um – wenn notwendig – eingreifen zu können. Erst ab Stufe 4 sind keine kritischen Eingriffe in die Fahraufgabe mehr erforderlich, und somit keine physische Präsenz einer Aufsichtsperson im Fahrzeug notwendig. Dann kann zum Beispiel eine sogenannte »technische Aufsicht« (TA) in einer Leitstelle bei Bedarf zugeschaltet werden, um Betriebshindernisse aufzulösen.

Heute hingegen findet der Betrieb solcher Systeme überwiegend nach VDA/SAE-Stufe 3 statt, bei denen eine SicherheitsfahrerIn oder ein Sicherheitsfahrer die Automatisierung durchgängig überwachen muss, und im Notfall eingreifen soll.

Expertenbefragung

Um die Herausforderungen der Branche zu klären, und Entwicklungsbedarfe zu analysieren, wurde zwischen September und Dezember 2024 eine Befragung von Expertinnen und Experten durchgeführt, die im Bereich Automatisierung von Fahrzeugen für den ÖPNV tätig sind. Insgesamt wurden n = 29 unabhängige Rückmeldungen unterschied-

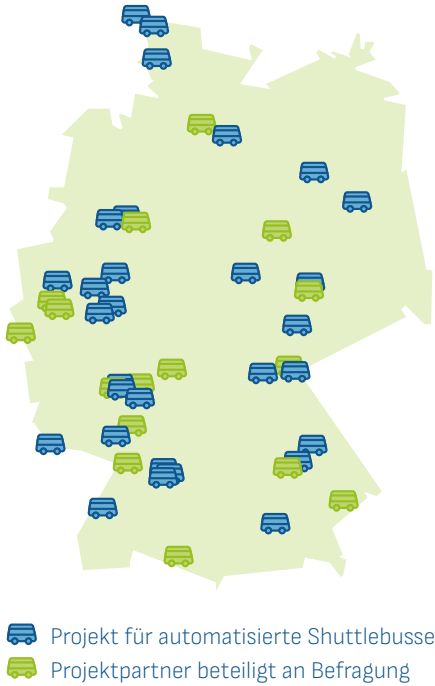


Abb. 2: Überblick über Projekte zum automatisierten Shuttlebus-Betrieb in Deutschland (Quelle: VDV), mit Hervorhebung von Projekten, deren Partner bekanntermaßen an der Befragung teilgenommen haben.

licher deutschlandweit tätiger Organisationen gesammelt, die an Shuttlebus-Projekten beteiligt sind. Die Organisationszugehörigkeit konnte vertraulich angegeben werden, zudem war eine Einsortierung in Tätigkeitsfelder möglich.

Eine Karte mit Shuttlebus-Projekten (nach VDV), an denen die teilnehmenden Organisationen beteiligt waren, findet sich in Abb. 2; eine Übersicht der abgedeckten Tätigkeitsfelder ist in Abb. 3 dargestellt.

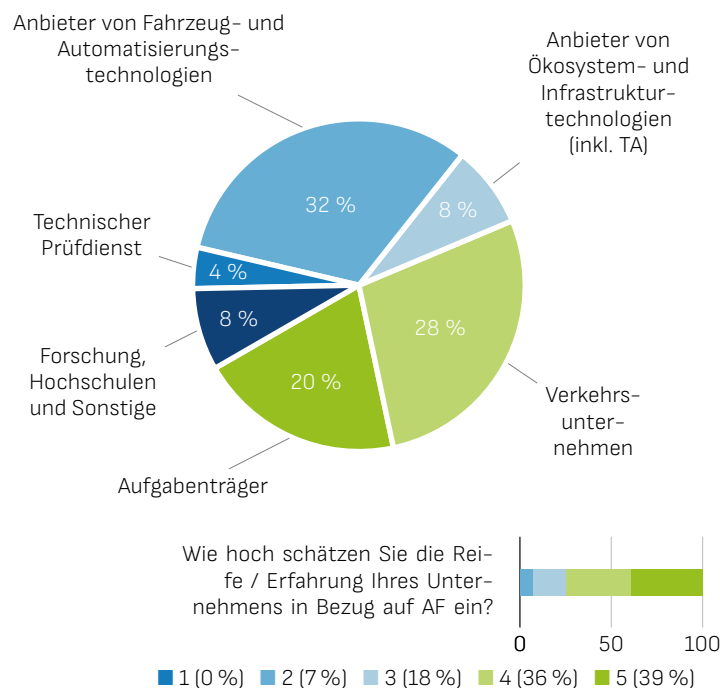


Abb. 3: Verteilung der Organisationen über die Befragten der Studie und Selbsteinschätzung zur fachlichen Erfahrung der Organisation.

Die Befragung wurde im Kontext einer Initiative zur Entwicklung eines Förderprojektvorschlags für das Fachprogramm »DNS der zukunftsfähigen Mobilität: Digital – Nachhaltig – Systemfähig«² des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) durchgeführt. Im Nachgang der Befragung haben sich mehrere der teilnehmenden Organisationen einer entsprechenden Projektskizze angeschlossen; die Autorinnen und Autoren der Studie und die befragten Organisationen sind allerdings disjunkt, und die Beteiligung an der Projektskizze, die zwischenzeitlich durch Ministerium und Projektträger zum Vollantrag aufgerufen wurde, war inhaltlich getrennt von den Rückmeldungen zur Befragung.

Zwischenzeitlich wurde durch das BMWK (seit April: BMWi) in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV, seit April: BMV) die Initiative »Ökosystem Mobilität 4.0«³ ins Leben gerufen und auf der Hannover Messe im März 2025 erstmalig vorgestellt, die sich unter anderem mit diesen Herausforderungen befassen soll, aber unabhängig von der Durchführung der Befragung ist.

Allgemeine Herausforderungen

Zunächst wurde eine Sortierung der Herausforderungen erhoben (Ergebnisse in Abb. 4), von 1 (am un-

wichtigsten) bis 9 (am wichtigsten), wobei als unbedeutend empfundene Themen aus der Priorisierung entfernt werden konnten. Im Ergebnis ist festzustellen, dass erhebliche Unterschiede in der Priorisierung der jeweiligen Aspekte bestehen. Insgesamt als eher unkritisch wahrgenommen werden Aspekte der Nutzerakzeptanz und der Mensch-Maschine-Schnittstelle, wohingegen Erprobungsaufwände, die Rolle der technischen Aufsicht (TA) sowie Sonder- und Unfälle und rechtliche Hürden wesentlich höher einsortiert wurden.

→ Fazit 1

Neben fehlender Technologiereife sind rechtliche Hürden und die Zulassung die größten Herausforderungen.

Die mit Abstand am höchsten priorisierte Herausforderung stellt die Technologiereife dar, die in Abb. 13 noch einmal detaillierter aufgeschlüsselt dargestellt wird. Demnach wird der höchste Entwicklungsbedarf bei der Automatisierungstechnologie gesehen, als »heute grundsätzlich fertig« hingegen am ehesten die Routenplanung. Insgesamt überwiegt aber bei allen genannten Punkten die Perspektive, dass noch mindestens moderater Entwicklungsbedarf für die Anwendung im automatisierten ÖV verbleibt.

→ Fazit 2

Es existiert noch ein hoher Entwicklungsbedarf bei den Technologien für durchgehende Anwendung und Verfügbarkeit im automatisierten öffentlichen Personennahverkehr.

Fragengruppe »Akzeptanz«

Weitere Einblicke ergeben sich aus den vertieften Auswertungen der einzelnen Fragengruppen. So werden die Aspekte aus der Fragengruppe »Akzeptanz« (Abb. 6) zwar nicht einhellig, aber deutlich überwiegend als hinreichend abgedeckt bewertet.

Rückmeldungen im Freitext umfassen den Hinweis, dass die »derzeitige Akzeptanz in Deutschland [...] noch genauer erfasst werden« und »in Aufklärung und Bildung zu den [Vorteilen] investiert werden« müsse; hierbei liegt der Bedarf aber eher auf spezifischen Auslegungen (etwa Innenraumbesichtigung) und der systematischen Schaffung von Akzeptanz. Eine generelle Akzeptanz für Automatisierung wird – sofern die Technologie sich als funktionierend er-

² www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/fahrzeug-und-systemtechnologien

³ oekosystemmobilitaet40.de

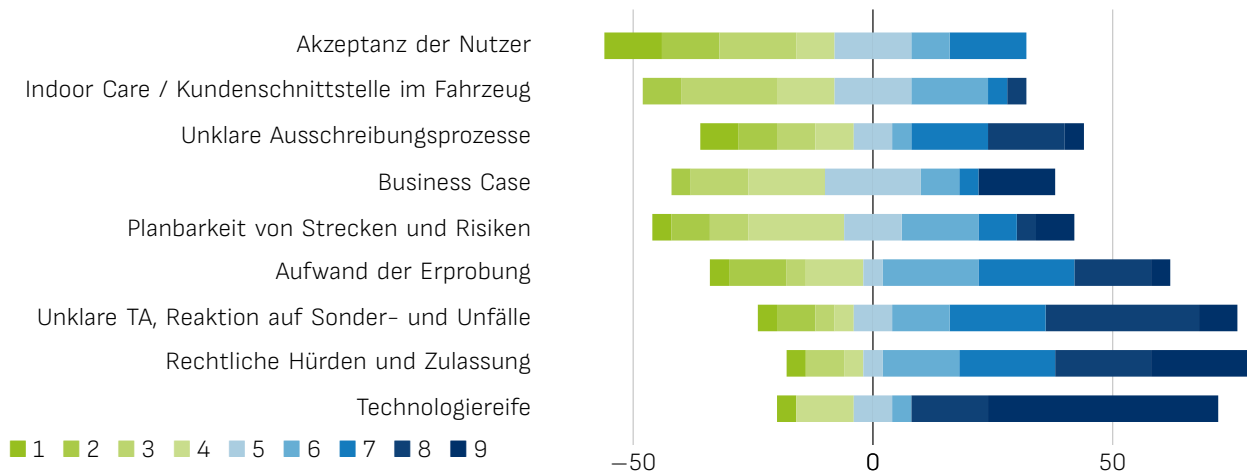


Abb. 4: »Bitte sortieren Sie die heutigen Herausforderungen aus Ihrer Sicht« auf einer Skala von 1 bis 9.

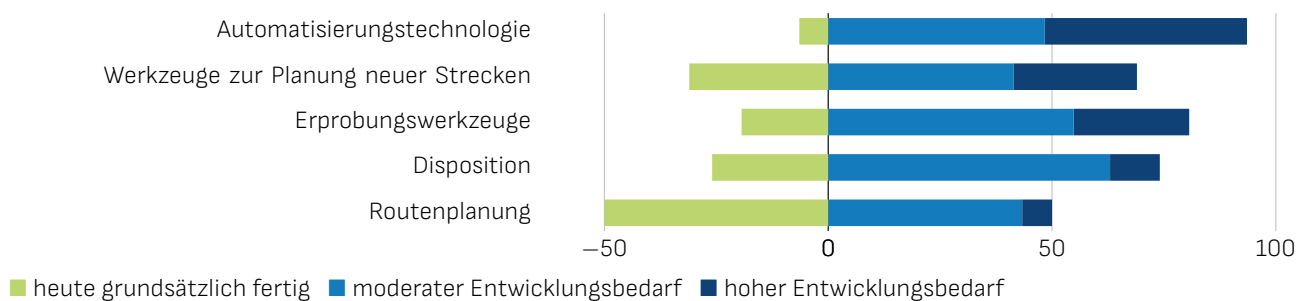


Abb. 5: »Wie sehen Sie die Reifegrade der jeweiligen Technologien für Anwendung im automatisierten ÖV?«

weist – in den Rückmeldungen als gegeben vorausgesetzt, auch unter Verweis auf einschlägige Studien zum Thema. Dabei wird auch auf die Projektfamilie PAVE⁴ verwiesen, die sich mit Akzeptanzfragen von Automatisierung in der Bevölkerung in Europa, den USA und dem Vereinigten Königreich befasst.

Während die grundsätzliche Akzeptanz überwiegend als absehbar betrachtet wird, kristallisieren sich in den Antworten Detailspekte der Umsetzung heraus, die die Akzeptanz maßgeblich formen. Zu diesen zählt unter anderem die Barrierefreiheit, Bedarfsgerechtigkeit, und die frühzeitige Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern in die Ausgestaltung. Ferner wird darauf verwiesen, dass auch seitens der Mitarbeitenden in den Verkehrsunternehmen die Akzeptanz der neuen Technologie, gerade angesichts beruflicher Disruptionen, ein kritischer zu berücksichtigender Faktor ist.

→ Fazit 3

Eine überwiegende grundsätzliche Akzeptanz in der Bevölkerung für automatisierte Fahrfunktionen wird vorausgesetzt. Im Detail hängt die Akzeptanz aber deutlich von der Umsetzung ab.

Fragengruppe »Ausschreibefähigkeit«

Differenzierter sind die Rückmeldungen in Bezug auf Ausschreibefähigkeit (Abb. 7). Kompetenzen zur Ausschreibung und Einführung werden sehr unterschiedlich bewertet, insbesondere für kommunenübergreifende Ausschreibeprozesse und Betriebsbereichsgenehmigungen werden derzeit noch wesentliche Lücken gesehen.

Zu sonstigen Faktoren, die die Ausschreibefähigkeit begrenzen, wird wiederholt angeführt, dass die Planbarkeit eines automatisierten ÖPNV-Betriebs derzeit als unzureichend gesehen wird. Dazu zählen Unklarheiten zu den benötigten personellen Betriebsabläufen, Rechten, Pflichten und Qualifikationen, sowie insbesondere Prozesse für Störungen im Betrieb, Aufgaben der technischen Aufsicht, und der Einsatz von Vernetzung und Kommunikation.

⁴ pavecampaign.org

Akzeptanzkriterien aus Sicht der Mitfahrenden sind ausreichend bekannt und werden in der Auslegung des AF-Service vollständig berücksichtigt.

Akzeptanzkriterien aus Sicht der Verkehrsteilnehmer zur erfolgreichen Integration von AF in den ÖV sind ausreichend bekannt.

Der AF-Service ist so ausgelegt, dass die spätere Umstellung von manuellem Service auf automatisierten Service die Attraktivität für Nutzende mindestens aufrecht erhält.

■ trifft gar nicht zu ■ trifft eher nicht zu ■ trifft eher zu ■ trifft voll zu

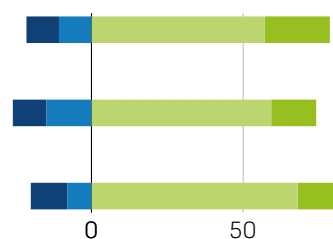


Abb. 6: Fragengruppe »Akzeptanz«.

Das Knowhow zur Projektleitung für das Deployment von AF auf städtischer/kommunaler Seite ist vollständig vorhanden.

Es existiert eine ausreichend gute Methodik zur Bewertung der Zielstrecke um das Projektierungsrisiko zu minimieren.

Ein klarer Ausschreibungs- und Vergabeprozess ist vorhanden.

Es besteht ausreichend Knowhow und Methodik zur Risikobewertung und -minimierung.

Ein Abgleich technischer Fähigkeiten von AF mit Anforderungen der ausschreibenden Seite ist problemlos möglich.

Die Zuständigkeiten für die Erteilung einer Betriebsbereichsgenehmigung sind kommunenübergreifend geklärt.

Die Fähigkeit zur Erstellung eines Lastenheftes zur Ausschreibung von AF ist vollumfänglich vorhanden.

Es existieren funktionierende Werkzeuge zur bedarfsgerechten Auslegung neuer Betriebsbereiche.

Es bestehen funktionierende kommunen- und städteübergreifende Konzepte für gemeinsame Ausschreibungen.

Brückentechnologien zur Sicherstellung hundertprozentiger Verfügbarkeit des AF-Service sind bekannt und werden im Ausschreibeprozess berücksichtigt.

■ trifft gar nicht zu ■ trifft eher nicht zu ■ trifft eher zu ■ trifft voll zu

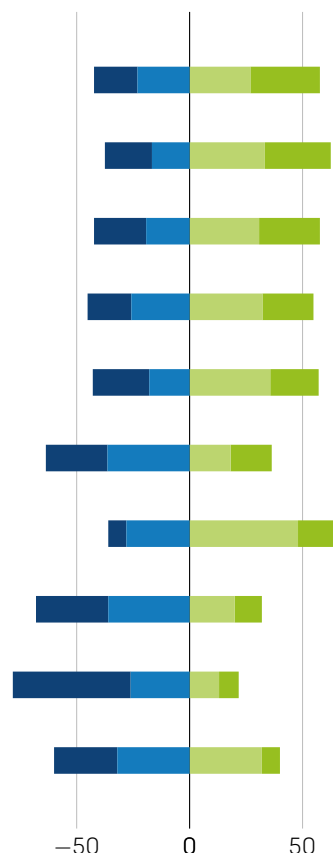


Abb. 7: Fragengruppe »Ausschreibungsfähigkeit«.

Auch wird angeführt, dass noch wesentliche rechtliche Fragen zur Ausschreibung von automatisiert fahrenden Fahrzeugen im ÖPNV durch Aufgabenträger ungeklärt sind. Insbesondere müssen das Vergaberecht und das Kartellrecht beachtet werden. Nur wenn eine Kooperationspartnerschaft über einen transparenten und verbindlichen Prozess die Beschaffung unter übereinstimmenden Bedingungen gemeinsam durchführt, können die rechtlichen Anforderungen erfüllt werden.

Es wird auch angeführt, dass die Offenheit von Verwaltungen für die gemeinsame Arbeit an automatisierten ÖPNV-Konzepten gesteigert werden muss. Auch der Ausbau der internationalen Kooperation für gemeinsame Lernprozesse wird als wesentlicher Faktor betrachtet.

→ Fazit 4

Aufgabenträger wie Kommunen und Städte sind nicht übergreifend ausschreibungsfähig, mögliche Skaleneffekte können nicht genutzt werden.

Fragengruppe »Finanzierung«

Der Themenbereich Finanzierung wird insgesamt von den Befragten als herausfordernd eingeschätzt. Für die Mehrheit ist eine klare Definition eines Geschäftsmodells aktuell nicht möglich und die Wirtschaftlichkeit ist nicht zuverlässig kalkulierbar. Es mangelt an Finanzierungskonzepten und -ideen, die

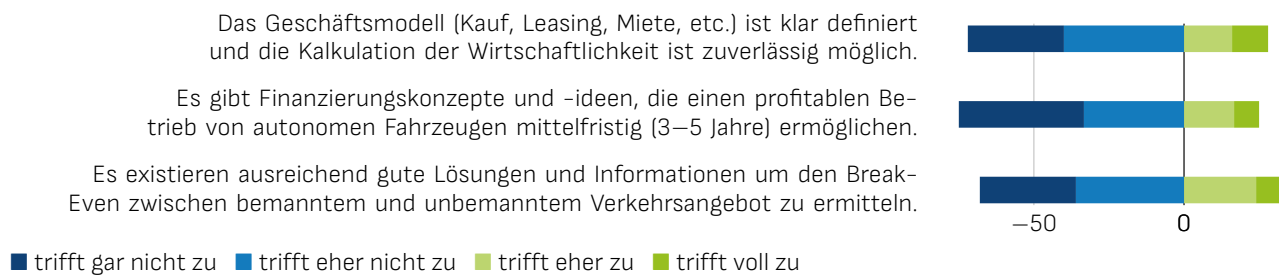


Abb. 8: Fragengruppe »Finanzierung«.

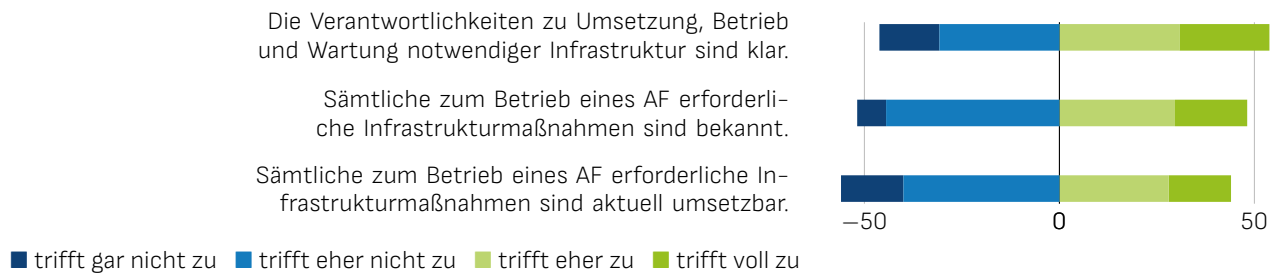


Abb. 9: Fragengruppe »Infrastrukturelle Anforderungen«.

einen profitablen Betrieb von autonomen Fahrzeugen mittelfristig ermöglichen. Es braucht gemäß der Mehrheit der Befragten noch mehr und bessere Lösungsansätze und Informationen, um den Break-Even zwischen bemannten und unbemannten Verkehrsangeboten zu ermitteln.

Bei der Einschätzung der Befragten ist zu berücksichtigen, dass der Einsatz autonom fahrender Fahrzeuge sowohl als Bestandteil des ÖPNV als auch im Rahmen rein privatwirtschaftlich organisierter und finanzierter Mobilitätsangebote erfolgen kann. In beiden Fällen, also unabhängig von der Finanzierung, unterliegt die gewerbliche Personenbeförderung in Deutschland einem strengen regulatorischen Rahmen, der im Personenbeförderungsgesetz (PBefG) (Bundesrepublik Deutschland, 2024) verankert ist. Dieses Gesetz regelt unter anderem die Genehmigungspflicht für den Linien- und Gelegenheitsverkehr sowie die Anforderungen an Betrieb, Sicherheit und soziale Standards. Auch Mobilitätsformen wie klassische Taxiverkehre und gebündelter Bedarfsverkehr/On-Demand-Angebote fallen unter diese Regulierung. Behörden besitzen weitreichende Steuerungs- und Eingriffsrechte, etwa bei der Festlegung von Betriebsgebieten, Mindestentgelten oder Sozialstandards, auch bei privatwirtschaftlich finanzierten Verkehren. Die Wahl des Geschäfts-/Finanzierungsmodells für den Einsatz autonomer Fahrzeuge stellt also eine grundlegende strategische Entscheidung mit weitreichenden Implikationen für die regulatorische Einbindung, die betriebliche Ausgestaltung sowie die langfristige wirtschaftliche Tragfähigkeit dar. Im öffentlichen

Diskurs in Deutschland dominiert aus verschiedenen Gründen der Einsatz als Teil des ÖPNV (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2024). Der öffentliche Verkehr in Deutschland wird durch eine Kombination aus Fahrgeldeinnahmen und staatlicher Finanzierung (Bund, Länder, Kommunen) getragen (Roland Berger/Intraplan/Florenus im Auftrag des VDV, 2021). Trotz hoher Investitionen in klassische ÖPNV-Infrastruktur fehlt es momentan gemäß zweier Befragter an einer zielgerichteten und regelmäßigen Finanzierung für Fahrzeuge mit autonomer Fahrfunktion und neue Mobilitätsformen wie On-Demand-Angebote. Es brauche ein klares politisches Commitment auf Bundesebene für langfristige Planungssicherheit.

→ Fazit 5

Businessmodelle und Finanzierungskonzepte sind noch nicht ausgereift und zeigen keine ausreichende Kostendeckung.

Fragengruppe »Infrastrukturelle Anforderungen«

In Abb. 9 werden Einschätzungen zum Thema Infrastruktur dargestellt. Zunächst wurde die Frage nach der Verantwortlichkeit bei der Umsetzung, dem Betrieb und der Wartung der Infrastruktur gestellt. Es zeigt sich ein gegensätzliches Bild: Ein Teil sieht die Verantwortung klar definiert, während ein noch größerer Anteil der Aussage überhaupt nicht zustimmt.

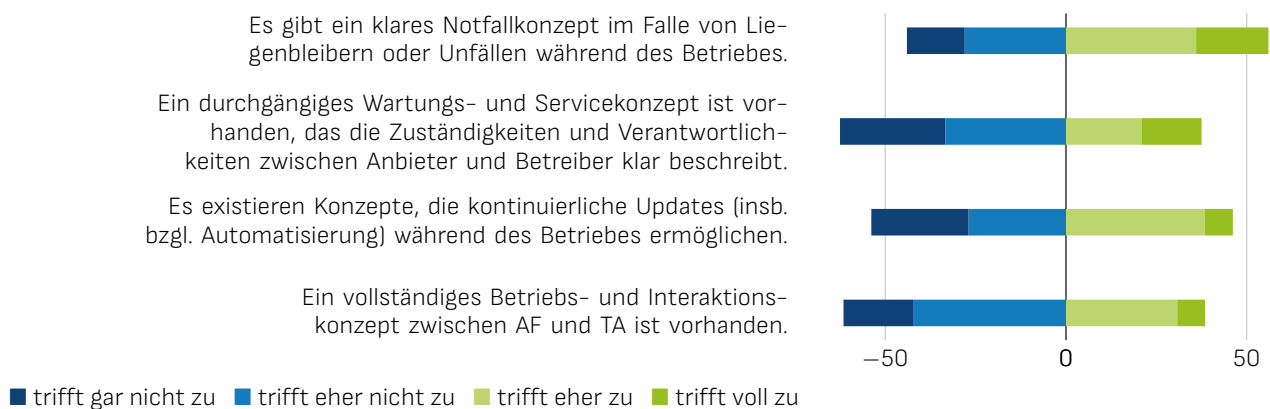


Abb. 10: Fragengruppe »Operations, Betriebskonzept, Überwachung«.

Die Meinungen unterscheiden sich auch innerhalb der Stakeholdergruppen stark.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Frage nach der Bekanntheit der nötigen Infrastrukturmaßnahmen. Allerdings schließen sich weniger Befragte einer eindeutigen Einschätzung an.

Bei der Frage nach der Umsetzbarkeit der Maßnahmen gibt es eine Tendenz zu der Aussage, dass diese noch nicht möglich ist. Generell sind Anbieter von Systemen eher überzeugt, dass alles geregelt und umsetzbar sei, während die Aufgabenträgerseite kritischer ist. Ein stärkerer Austausch und eine verbesserte Wissensverbreitung zwischen den Akteuren sind daher notwendig.

In den Freitextantworten finden sich weitere Hinweise auf infrastrukturelle Herausforderungen, darunter die unterschiedlichen Verantwortlichkeiten für Straßeninfrastruktur, Telekommunikationsinfrastruktur, sowie Fahrzeug- und Betriebsinfrastruktur, durch die erhebliche Kommunikationsaufwände entstehen. Es wird wiederholt festgehalten, dass die »gewachsene« Infrastruktur der urbanen Räume ein besonders herausforderndes Umfeld darstellt, und Neubauprojekte dringend Automatisierungstauglichkeit mitdenken sollten.



Die Verantwortlichkeiten für Straßen-Infrastruktur, Telekommunikations-Infrastruktur, Fahrzeug- bzw. Betriebs-Infrastruktur liegen in verschiedenen Händen und bedürfen intensiver Abstimmungs- und Koordinierungsmaßnahmen.«

Rückmeldung einer Prüforganisation

Unterschiedlich wahrgenommen wird die Frage, wie stark sich automatisierte Fahrzeuge von Infrastruktur abhängig machen sollten, angesichts der erwarteten Aufwände, diese auszubauen und zu warten. Während einige Befragte hohen Infrastrukturbedarf erwarten, wird durch andere ausdrücklich bezweifelt, dass stark Infrastruktur-abhängige Lösungen zukunftsfähig sind. Allgemein wird festgehalten, dass Anforderungen an die Infrastruktur heute nur unzureichend bekannt sind.

→ Fazit 6

Zum Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs erforderliche Infrastrukturmaßnahmen sind aktuell nicht vollständig umsetzbar und wenig standardisiert.

Fragengruppe »Operations, Betriebskonzept, Überwachung«

Die in Abb. 9 dargestellten Ergebnisse dieser Fragegruppe zeigen eine insgesamt große Bandbreite, wobei sich ein wahrgenommener Mangel an Operations-, Betriebs- und Überwachungskonzepten abzeichnet.

Notfallkonzepte scheinen bei den Befragten in gleichen Teilen zu existieren und zu fehlen. Gleiches kann auch für weitere, für den Betrieb notwendige Konzepte angenommen werden. Somit sollte hier auf einen Austausch hingearbeitet werden, vorhandene Konzepte zur Diskussion zu stellen, diese gemeinsam zu verbessern und gegebenenfalls zu erweitern und im weiteren Verlauf für die Branche zu standardisieren.

Hinsichtlich Wartungs- und Servicekonzepten als auch Updateprozessen gibt die Mehrheit noch offene Informationsbedarfe an.

Die Mehrheit gibt zudem Informationsbedarfe bei Betriebs- und Interaktionskonzepten zwischen selbst-fahrenden Fahrzeugen und technischer Aufsicht an.

In den Detailantworten wurde darauf verwiesen, dass die Schaffung von Konzepten und Prozessen nur dann wirksam sein kann, wenn auch Kompetenzen bei Betrieben und deren Mitarbeitenden aufgebaut werden, diese Prozesse anzuwenden. Die Notwendigkeit von Schulungen wurde wiederholt herausgestellt. Als wichtiger Aspekt wurde betont, dass Prozesse mit großen Flotten von Fahrzeugen skalieren müssen. Als herausfordernde Prozesse wurden die Aufgaben der Leitstelle und Fernüberwachung, die Arbeitsabläufe der technischen Aufsicht, sowie Notfall- und Servicekonzepte benannt.

→ Fazit 7

Ein vollständiges Betriebs- und Interaktionskonzept zwischen automatisierten Fahrzeugen und technischer Aufsicht, inklusive Service- und Wartungskonzepten sowie Brückentechnologien wie Remote- und Teleoperation, fehlen momentan.

Fragengruppe »Zulassung und gesetzliche Anforderungen«

Die Antworten zu Zulassung und gesetzlichen Anforderungen, dargestellt in Abb. 11, ergeben wiederum ein differenziertes Bild. Auffällig ist, dass – im Gegensatz zur großen Mehrheit der Rückmeldungen in der Befragung – die Zuständigkeiten für die Erteilung von Betriebsbereichsgenehmigungen von niemandem als völlig ungeklärt eingeschätzt werden. Hier überwiegen deutlich die optimistischeren Einschätzungen.

Prozess und Kriterien für die Betriebsbereichszulassung werden von den Befragten dieser Fragegruppe im Vergleich am kritischsten beurteilt – ebenso wie andere prozessbezogene Fragestellungen. Dies unterstreicht den bestehenden Handlungsbedarf in diesem Bereich. Besonders hervorgehoben wird dabei eine unzureichende Kenntnis der UN/ECE-Regelung Nr. 107 (UN/ECE, 2015), insbesondere bei den »neuen« Herstellern. Diese Regelung enthält die »Einheitlichen Bestimmungen für die Genehmigung von Fahrzeugen der Klassen M2 und M3 hinsichtlich ihrer allgemeinen Konstruktionsmerkmale«. Dabei beziehen sich die Klassen M2 und M3 auf Kraftomnibusse mit bis bzw. mehr als acht Fahrgastplätzen.

Demgegenüber bewerten die Befragten den Stand der gesetzlichen Rahmenbedingungen für Zulas-

sung und Betrieb überwiegend als leicht bis sehr optimistisch.

Bewertung des Optimismus nach Tätigkeitsfeldern

Die zuvor genannten Fragengruppen sind so strukturiert, dass eine zustimmende Beantwortung der Fragen (trifft eher / voll zu) eine optimistische Perspektive auf den aktuellen Stand der Möglichkeiten darstellt, wohingegen eine Ablehnung (trifft gar nicht / eher nicht zu) eine eher pessimistische Perspektive darstellt.

Entsprechend kann eine Aufschlüsselung der Antworten nach den jeweiligen Tätigkeitsfeldern, dargestellt in Abb. 12, eine Abschätzung geben, wie optimistisch die Befragten aus den jeweiligen Tätigkeitsfeldern auf den Fortschritt der Automatisierung blicken. Dargestellt sind die (gewichteten) Anzahlen der jeweiligen Einzelantworten auf die Fragen, um die Verteilung möglichst wenig zu verzerren, da nicht alle Befragten alle Fragenblöcke beantworten konnten, und nicht alle Tätigkeitsfelder gleichmäßig vertreten waren (s. Abb. 3).

Es zeigt sich, dass die technischen Prüfdienste am optimistischsten auf die Vorbereitung zum automatisierten Fahren blicken, gefolgt von den Anbietern von Systemen für die technische Aufsicht.

Von den größten Gruppen der Befragten, den Anbietern von Fahrzeug- und Automatisierungstechnologien, Verkehrsunternehmen und Aufgabenträgern, kommt ein deutlich skeptischeres Bild auf die Herausforderungen. Insbesondere die Aufgabenträger sehen, dass die verbleibenden Herausforderungen in der Bilanz der Fragen deutlich überwiegen.

Noch pessimistischer blicken lediglich die Anbieter der Ökosystem- und Infrastrukturtechnologien auf den Stand zum automatisierten Fahren, die allerdings einen deutlich geringeren Anteil der Antworten ausmachen. Von ihnen werden kaum Aspekte als abschließend gelöst wahrgenommen.

Bewertung möglicher Maßnahmen zur Lösung der Herausforderungen

Um konkrete Lösungswege diskutieren und bewerten zu können, die eine potentielle Grundlage für gezielte künftige Projektaktivitäten darstellen, wurde ein spezifisches Zielbild skizziert (s. Box »Zur Diskussion gestelltes Zielbild«). Dieses beschreibt die Vision eines digitalen Ökosystems kompatibler Werkzeuge und Produkte, das einen durchgängigen Prozess von der Planung bis zur Zulassung der Fahrzeuge ermöglicht (vgl. auch Luchmann u. a., 2024).

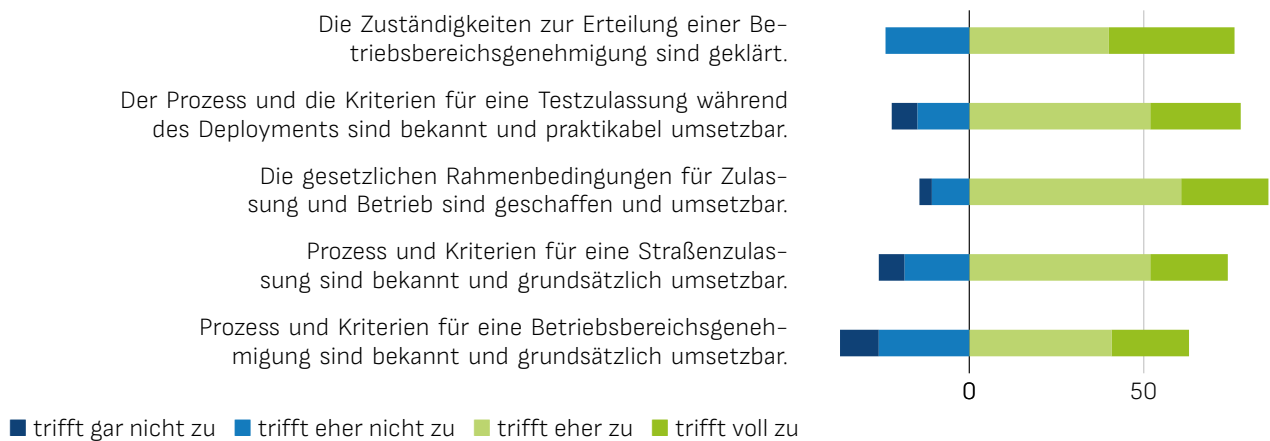


Abb. 11: Fragengruppe »Zulassung und gesetzliche Anforderungen«.

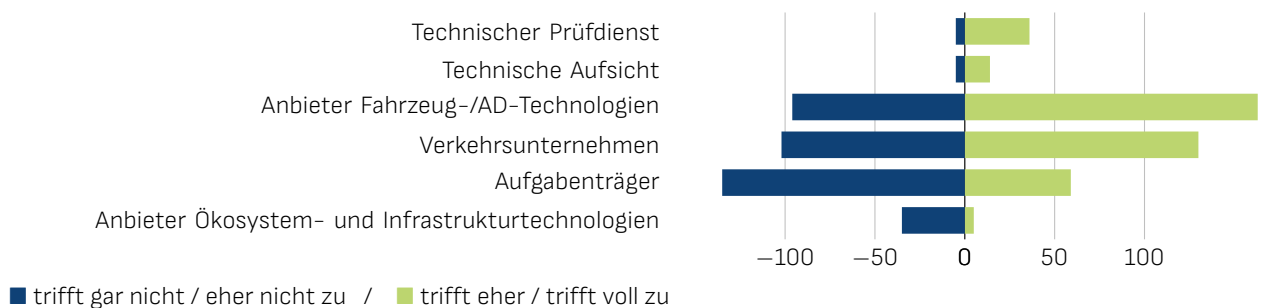


Abb. 12: Rückmeldungen auf die Fragengruppen nach Tätigkeitsfeldern, wobei die Antworten »gar nicht« bzw. »voll« doppelt gewichtet wurden.

Dieses Ökosystem soll etwa Ausschreibungen, Inbetriebnahme, Freigabe und Wirtschaftlichkeitsabschätzungen mit digitalen Werkzeugen unterstützen, und dazu insbesondere digitale Zwillinge des Betriebsbereichs niederschwellig zugänglich machen, in denen virtuell und realitätsnah der Betrieb erprobt werden kann.

Einheitliche Kategorisierungen zu Einsatzumgebungen (ODD) ermöglichen die Bündelung von Ausschreibungen von Städten und Kommunen mit vergleichbaren Anforderungen.

Basierend auf diesem Zielbild wurden Teilaspekte dessen herausgegriffen und in Einzelbewertungen hinterfragt. Ferner wurde eine Abschätzung eingeholt, bis zu welcher Jahreszahl eine Einführung von mindestens 10.000 automatisierten Fahrzeugen im ÖPNV erwartet wird – einmal ohne entsprechende Skalierungsmaßnahmen, und einmal mit diesen.

Die Ergebnisse dieser Fragen sind in Abb. 13 dargestellt. Dabei zeigt sich eine überwiegend positive Bewertung, dass dieses Zielbild »etwas« oder »sehr« zur Lösung der empfundenen Herausforderungen beitragen würde.

Als stärkste Skalierungsmaßnahme wurde die Entwicklung einer Kategorisierung von Strecken nach

Einsatzbereichen (ODD) empfunden, anhand derer vergleichbare Einsatzumgebungen identifiziert und beispielsweise für Ausschreibungen genutzt werden können. Die Möglichkeit der überregionalen Bündelung von Ausschreibungen selbst allerdings wurde nur von einer im Vergleich geringeren Anzahl der Befragten als »sehr nützlich« eingeschätzt. Da mehr Personen die Streckenkategorisierung als »sehr nützlich« eingestuft haben, scheint diese über die Bündelung von Ausschreibungen hinaus für sie weitere Vorteile zu bergen.

Die Detailrückmeldungen zum Thema stellten dar, dass eine Kategorisierung der Strecken wesentlich auf der herstellerseitigen ODD-Abschätzung der automatisierten Fahrzeuge beruhen muss, auch unter Verweis auf den entsprechenden Standard ASAM OpenODD ⁵, der im April 2025, und damit nach Abschluss der Befragung, veröffentlicht wurde. Ferner wurde festgestellt, dass Werkzeuge zur Erzeugung einer solchen Kategorisierung niederschwellig nutzbar sein müssen, um verbreitet angewendet zu werden. Eine Digitalisierung von Infrastruktur und Karten, sowie die Integration kurzfristiger Maßnahmen, wie Baustellen oder Groß-Veranstaltungen, wurden als wesentlich betrachtet.

⁵ www.asam.net/standards/detail/openodd/

→ **Zur Diskussion gestelltes Zielbild**

Betrachten Sie bitte die Vision eines von »Ende zu Ende« digitalisierten Gesamtprozesses von Städten/Kommunen, über Betreiber bis hin zu den Anbietern von Automatisierungs-Technologie und Brückentechnologien.

Ein Ökosystem kompatibler digitaler Werkzeuge und Produkte...

... ermöglicht eine gemeinsame städte- und kommunenübergreifende Ausschreibung und Umsetzungsplanung.

... reduziert den Aufwand für die Inbetriebnahme und Freigabe automatisierter Fahrzeuge und ggf. notwendiger Brückentechnologien durch Standardisierung, Digitalisierung und Automatisierung auf ein Minimum.

... modelliert und indiziert die erforderlichen Aspekte für einen profitablen Betrieb (Akzeptanz, Effizienz, Finanzierungsoptionen etc.) quantitativ.

... schafft einfachere Rahmenbedingungen für den profitablen Betrieb über übertragbare Prozesse und Verfahren sowie technische Lösungen.

In digitalen Zwillingen der Einsatzumgebung können Systeme entwickelt und realitätsnah virtuell erprobt werden. Grenzfälle und Engpässe im Betrieb werden frühzeitig sichtbar und können adressiert werden, bevor sie in der Praxis erstmalig eintreten. Servicekonzepte und Umsetzungen der technischen Aufsicht können realitätsnah exploriert werden – individuell durch Stakeholder oder, durch definierte Schnittstellen, gemeinsam mit Lösungsanbietern.

Darüber hinaus können Kommunen und Städte ihre Einsatzumgebungen (geforderte ODD) kartieren und klassifizieren lassen, und bei gleicher oder ähnlicher Klassifizierung Ausschreibungen mit anderen Städten und Kommunen bündeln. Beförderungskonzepte können optimiert werden, auch in Hinblick auf die Identifikation von Teilstrecken, die gute Bedingungen zur Automatisierung bieten. Finanzierungsoptionen für den Business-Case einer automatisierten Strecke können gesucht und gefunden werden, dank quantitativer Prognosen, wie sich der Betrieb in der Praxis gestalten wird.

Überwiegend als nützlich oder sehr nützlich, aber ausnahmsweise auch einmal als explizit kontraproduktiv wurde der automatisierte Abgleich zwischen solchen Streckenanforderungen und Systemanbietern für automatisierte Fahrzeuge bewertet. Als Grund dafür wurde angeführt, dass eine zu streckenspezifische Auslegung von Fahrzeugen dazu führen könnte, dass die breite Einsetzbarkeit im dringend benötigten Transfer vom ländlichen in den urbanen Raum nicht gegeben sein könnte.

Andere Rückmeldungen begrüßen hingegen die Synergieeffekte in der gebündelten Ausschreibung und die erreichbare Transparenz bezüglich Anforderungen. Auch wird erwartet, dass die gebündelte Nachfrage ein wirtschaftlich vertretbares Angebot befördert; gleichwohl wird angeführt, dass die initialen finanziellen Aufwände für die Beschaffung dadurch allein nicht gelöst werden können.

Die vorbereitende Betriebsbereichsgenehmigung auf Grundlage digitaler Zwillinge wird ebenfalls positiv bewertet, insbesondere durch die Möglichkeit, schon früh »verschiedene Szenarien und Testfahrten [durchführen zu können] und Schwierigkeiten der Strecke [...] schneller [und] nicht erst im Betrieb« identifizieren zu können. Allerdings sollten solche digitale Zwillinge nicht die alleinige Grundlage einer Zulassung darstellen.

Immer noch positiv, aber in geringerem Anteil als »sehr nützlich« bewertet wurden die Monetarisie-

rung von Daten über Datenmarktplätze, und die Prognose von Nutzungsformen und Nutzungsakzeptanz. Dies geschieht konsistent mit den vorherigen Rückmeldungen, nach denen die Befragten die Akzeptanz unter allen offenen Herausforderungen als die geringste bewerteten.

Insgesamt zeigt sich eine deutliche Verkürzung der erwarteten Einführungsjahre, sofern als hilfreich empfundene Maßnahmen ergriffen werden. Während ohne aktive Skalierungsmaßnahmen die optimistischste Rückmeldung eine Einführung von 10.000 automatisierten Fahrzeugen im Jahre 2030 sieht, und die meisten Befragten 2034 schätzen (mitunter sogar 2048), sieht die Mehrheit der Befragten mit entsprechenden Maßnahmen eine Erreichung dieser Umfänge bis 2029 als realistisch an, im pessimistischen Fall bis 2039.

→ **Fazit 8**

Ohne zusätzliche Skalierungsmaßnahmen ist mit einem nennenswerten automatisierten Fahrbetrieb im öffentlichen Verkehr erst in 15 Jahren zu rechnen.

Gesamtfazit und Diskussion

Die Ergebnisse der Befragung zeichnen ein differenziertes Bild der Herausforderungen, das trotz deut-

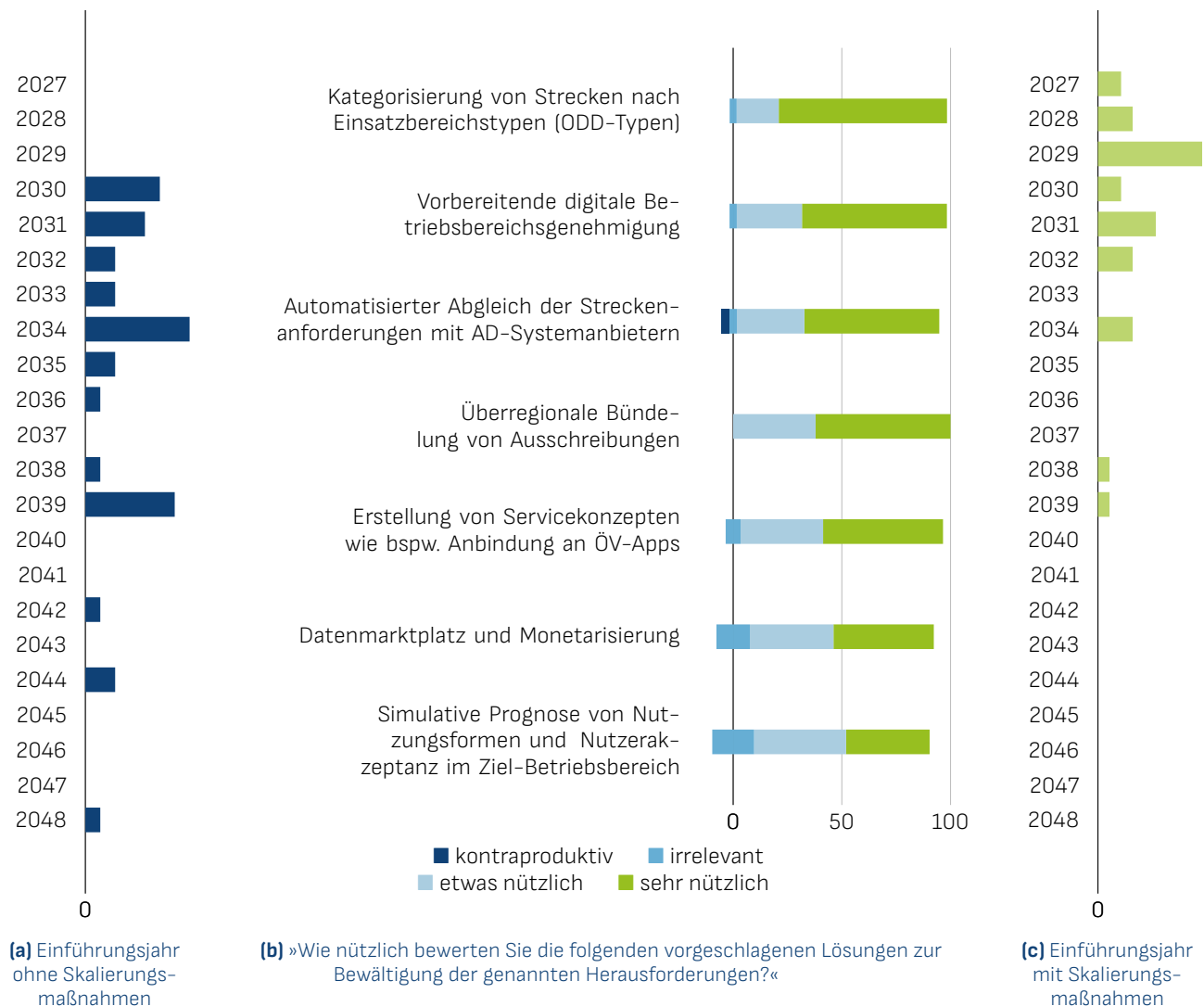


Abb. 13: Fragen zur Wirkung von vorgeschlagenen Maßnahmen. a), c): »Bis zu welchem Jahr erwarten Sie die überregionale Einführung von insgesamt mindestens 10.000 AF-Systemen im ÖPNV ohne und mit entsprechenden Maßnahmen, um die Skalierung zu unterstützen?« b): Bewertung der Nützlichkeit der Maßnahmen.

licher Unterschiede im Detail auch sehr große und systematische Gemeinsamkeiten offenbart.

Entgegen der Erwartungen zeigt sich, dass die große Mehrheit der Befragten inzwischen eine grundsätzlich offene Haltung der Menschen gegenüber automatisiertem Fahren erwartet, wobei gleichzeitig in vielen Rückmeldungen betont wird, dass die tatsächliche Akzeptanz in der Praxis durch konkrete technische und betriebliche Lösungen erworben werden muss.

Große Herausforderungen werden insbesondere in den Unsicherheiten zu betrieblichen Aspekten, technischer Aufsicht und Sonderfällen gesehen, sowie in Bezug auf technische Hürden und Zulassung, die zu deutlich erhöhten Aufwänden in der Einführung des automatisierten Fahrens liegen.

Mit Abstand am häufigsten als größte Herausforderung wurde jedoch die Technologiereife im automatisierten Fahren bewertet, darunter insbeson-

dere die Automatisierungstechnologie selbst, aber auch unterstützende Werkzeuge für Planung, Erprobung und Disposition. Wiederholt wurde angeführt, dass erst die Verfügbarkeit zulassungsfähiger Fahrzeuge viele der anderen Herausforderungen nach sich ziehen kann, und hier noch erhebliche Entwicklungsbedarfe gesehen werden.

Eine zur Diskussion gestellte Zukunftsvision, die diese Herausforderungen durch ein Ökosystem an vernetzten Diensten für die digitale Planung, Abschätzung, Bewertung, bis hin zur Ausschreibung und Zulassung adressiert, wurde von der deutlichen Mehrheit der Befragten als nützlich oder sehr nützlich zur Lösung der Herausforderungen betrachtet.

Es unterstreicht den Charakter der Befragungsergebnisse, dass in Bezug auf die Einführung des automatisierten ÖPNV zwar einerseits deutliche Herausforderungen gesehen und klar benannt werden, aber andererseits kein unspezifischer Pessimismus



Aufgabenträger [müssen ihre] Kooperationsbereitschaft zum betreffenden Beschaffungsziel verbindlich erklären und sich auf einen [vollständig gleichen] Ausschreibungstext verständigen, um dann eine gebündelte Ausschreibung durchzuführen. [...] Die hohe gebündelte Nachfrage führt zu einem Angebot, [das] angesichts der Eröffnung dieses neuen Aktionsfelds in einen wirtschaftlich vertretbaren Innovationsrahmen bleibt.«

Rückmeldung eines Verkehrsverbunds



Unsere Erfahrung hat gezeigt, dass gebündelte Beschaffungen trotz der überwiegenden Vorteile aufgrund unterschiedlicher Anforderungen durch [Verkehrsunternehmen] bereits auf Landesebene schwierig sein können. Auch wird der Nutzen durch die Beschaffenden selbst als eher gering eingeschätzt.«

Rückmeldung eines Verkehrsverbunds

herrscht. Die bestehenden Probleme werden überwiegend als lösbar eingeschätzt, wobei die Digitalisierung von Prozessen und Dienstleistungen als erheblicher Beschleuniger wahrgenommen wird.

Die Befragung kann mit einer Stichprobe von Expertinnen und Experten aus 29 Organisationen dabei lediglich eine eingeschränkte Abschätzung auf die Perspektive von Unternehmen und Organisationen im Sektor geben, überdeckt jedoch ein breites Spektrum an anwendungsnahen Akteuren und Aufgabenbereichen.

Die ergriffenen Maßnahmen in Deutschland und Europa in den kommenden Jahren werden den Blick darauf schärfen, inwieweit sich die genannten Perspektiven und Prognosen bewahrheiten, und mit darüber entscheiden, wann ein skalierter Regelbetrieb von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr Wirklichkeit wird. ■



[In dem vorgestellten Zielbild] werden die Blockaden und zu lösenden Fragen [adressiert]. Genau das brauchen wir jetzt, nachdem die Technologie fast ausgereift und marktfähig ist (je nach Herstellerregion). Wir müssen in den F&E-Projekten mehr entwicklungsbegleitende Forschung praktizieren und keine Basisforschung. Das »entwickeln« der letzten 5% zum echten ÖPNV Angebot muss gefördert werden.«

Andreas Fehr
Senior Projektleiter für Autonomes Fahren
DB Regio Bus

Literaturverweise

- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Dez. 2024). *Die Zukunft fährt autonom – Strategie der Bundesregierung für autonomes Fahren im Straßenverkehr*.
- Bundesrepublik Deutschland (2024). *Personenbeförderungsgesetz (PBefG)*.
- CDU, CSU und SPD (Apr. 2025). *Verantwortung für Deutschland: Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD*.
- Doll, Claus u. a. (Jan. 2025). *Fraunhofer-Positionspapier Leistungsfähige und nachhaltige Mobilitätswirtschaft*.
- Luchmann, Inga u. a. (Nov. 2024). *Autonomes Fahren im öffentlichen Verkehr – Ein Handbuch mit Vorschlägen für die Umsetzung in der kommunalen Praxis*.
- Roland Berger/Intraplan/Florenus im Auftrag des VDV (2021). *Verkehrswende gestalten – Gutachten über die Finanzierung von Leistungskosten der öffentlichen Mobilität*.
- SAE International (Sep. 2016). *J3016 – Surface Vehicle Recommended Practice – Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*.
- UN/ECE (Juni 2015). *Regelung Nr. 107 – Einheitliche Bestimmungen für die Genehmigung von Fahrzeugen der Klassen M2 oder M3 hinsichtlich ihrer allgemeinen Konstruktionsmerkmale [2015/922]*.



KAMO

KARLSRUHE MOBILITY

HIGH PERFORMANCE CENTER / PROFILREGION



KAMO.ONE

Das **KAMO: Karlsruhe Mobility Leistungszentrum** (engl. High Performance Center) ist der Zusammenschluss der Karlsruher Institutionen für Forschung, Lehre und Transfer. Seit der Gründung 2016 – damals als »Leistungszentrum Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe« gestartet – ist das Zentrum der zentrale Anlaufpunkt für interdisziplinäre Forschung und Entwicklung im Bereich Mobilität in Karlsruhe.

Seit sieben Jahren arbeiten in diesem Verbund die Karlsruher Forschungseinrichtungen Fraunhofer ICT, IOSB, ISI und IWM, das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das FZI Forschungszentrum Informatik und die Hochschule Karlsruhe (HKA) an der Mobilität von morgen, und unterstützen regionale, nationale und internationale Partner aus Wirtschaft, Forschung und öffentlicher Hand dabei, neue Ideen Wirklichkeit werden zu lassen.

TOGETHER, WE TAKE YOUR IDEAS FURTHER!



Hochschule Karlsruhe
University of
Applied Sciences





→ *Mobilitätsforschung vor Ort erleben und Entwicklungen diskutieren!*

Regelmäßig stellen wir im **FORSCHUNGS.FOCACCIA** im TRIANGEL-Space in Karlsruhe am Durlacher Tor konkrete Ergebnisse zu abgeschlossenen Forschungsprojekten vor.

Forscherinnen und Forscher aus Karlsruhe und innovative Unternehmen stehen in der Diskussion Rede und Antwort. Verhungern ausgeschlossen: Es gibt Getränke und frisches Focaccia aus der Region!



Eine Anmeldung ist nicht erforderlich, aktuelle Termine, Themen und Informationen finden sich online unter:

www.kamo.one/forschungs-focaccia/



→ Ihre Perspektive bringt uns weiter!



Gefällt Ihnen unser KAMO.Magazin? Gefällt es Ihnen nicht? Welche Ideen bewegen Sie? Nehmen Sie mit uns Kontakt auf, und gestalten Sie die Zukunft mit!

Zum Beispiel auch durch Teilnahme an unserer Online-Befragung zur aktuellen Ausgabe:
<https://www.kamo.one/kamo-magazin-feedback-11-2025/>

KAMO.Magazin

kamo.one/magazin

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7
76327 Pfinztal



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0):
creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de

ISSN (Print) 2941-7511

ISSN (Online) 2941-7554

© Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich, sofern nicht durch die obige Lizenz gedeckt.



KAMO: Karlsruhe Mobility — Leistungszentrum
www.kamo.one kamo.one/magazin



KAMO.Magazin

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7
76327 Pfinztal

Telefon +49 721 4640-0

Fax +49 721 4640-111

info@ict.fraunhofer.de

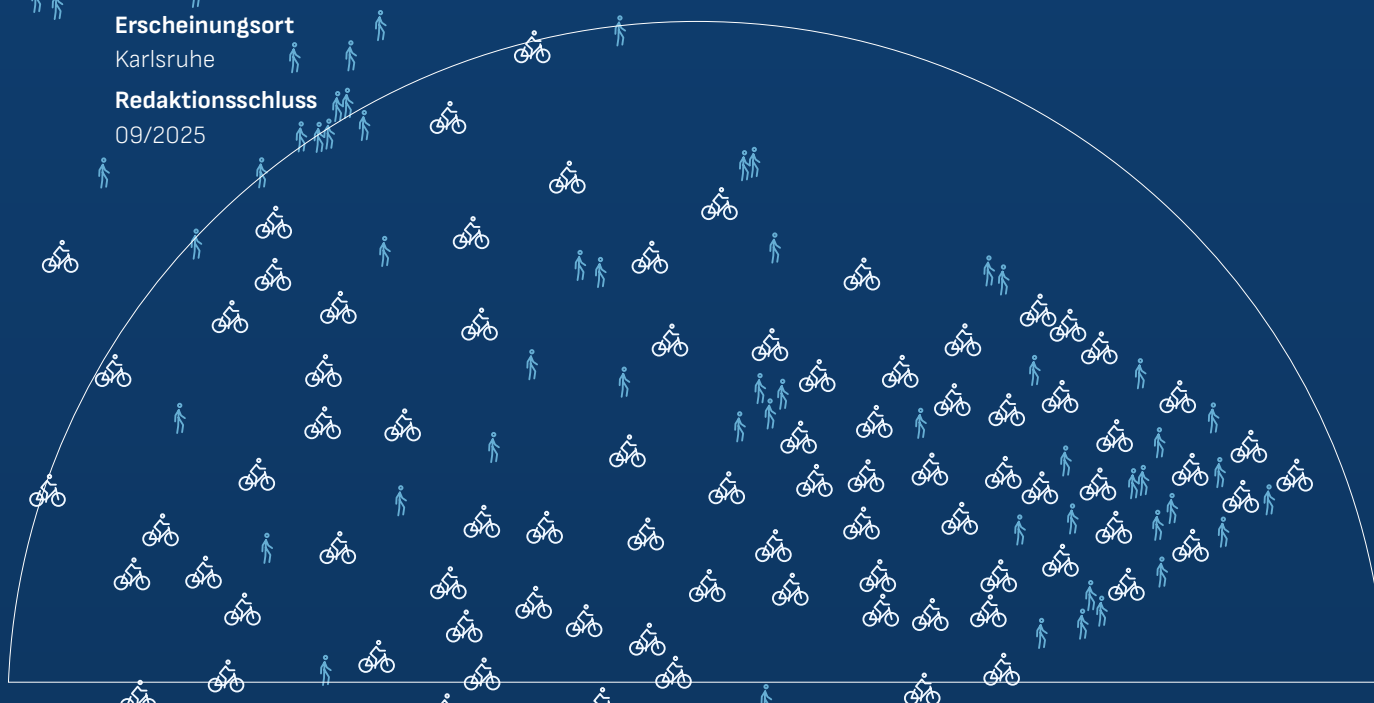
www.ict.fraunhofer.de

Erscheinungsort

Karlsruhe

Redaktionsschluss

09/2025



ISSN (Print) 2941-7511

ISSN (Online) 2941-7554

DOI 10.5445/IR/1000186533

© Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich,
sofern nicht durch die Lizenz CC BY 4.0 gedeckt.