

Sind höfliche autonome Autos auch gut für den Verkehrsfluss?

➤ Seite 30

Anpassung eines Einzylinder-Ottomotors für den Wasserstoffbetrieb und maximale Effizienz

➤ Seite 44

Wie bringen uns Künstliche Intelligenz und Daten nahtlos und nachhaltig ans Ziel?

➤ Seite 24

Titelthema

➔ **Der digitale Zwilling unserer Mobilität:**  
Wie virtuelle Welten innovative Ideen schneller und sicherer in Verkehr bringen.



# KAMO.MAGAZIN

KARLSRUHE MOBILITY  
HIGH PERFORMANCE CENTER / PROFILREGION

**Mobilitätsforschung  
kompakt und verständlich:**

Karlsruher Aktivitäten laufender Forschungsprojekte und aktuelle wissenschaftliche Ergebnisse

Wie beweist man die Sicherheit autonomer Fahrzeuge, bevor man sie in den Verkehr bringt?

➤ Seite 10

Modellierung der Emissionen eines Benzinmotors während hochdynamischen Betriebs durch maschinelles Lernen

➤ Seite 58



## 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**

08/2023

**ISSN** (Print) 2941-7511

**ISSN** (Online) 2941-7554

© Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

## [KAMO.INFO]

Dr. Miriam Ruf (Fraunhofer ICT) und Dr. Matthias Vollat (KIT-Institut für Fahrzeugsystemtechnik),  
Leiterin und Leiter der Geschäftsstelle Karlsruhe Mobility High Performance Center

# Liebe Leserinnen und Leser,



**Mobilität entwickelt sich mit einer immensen Geschwindigkeit weiter: Ob automatisiertes Fahren, Elektrifizierung und Wasserstoff, Digitalisierung und Vernetzung oder intermodale Verkehrsmittel – nahezu sämtliche Facetten sind Umbrüchen unterworfen. Wer diese Transformationen nicht nur erleben, sondern gestalten und Mehrwerte frühzeitig nutzen will, muss den Überblick behalten und die Entwicklung mitvollziehen.**

Mit unserer neuen Veröffentlichungsreihe »KAMO-Magazin« wollen wir Sie in regelmäßigen Abständen über wesentliche Entwicklungen und Trends aus Forschungsprojekten, Angeboten und Entwicklungen der Branche aus Karlsruhe informieren. Wie überall in der Mobilität ist auch unsere Entwicklung ein stetiger Prozess. Wir möchten mit den Neuerungen, die wir hiermit anstoßen, die bewährte Zusammenarbeit mit unseren Partnern intensivieren, und die Tür zu neuen Kooperationsthemen öffnen.

In der Rubrik **[PROJEKT.EINBLICK]** stellen wir ab Seite 9 abgeschlossene oder laufende Projekte vor. Wir geben Einblick in die gesteckten Ziele, den aktuellen Stand und stellen die Köpfe hinter den Projekten vor.

In der Rubrik **[FORSCHUNG.KOMPAKT]** stellen wir ab Seite 28 aktuelle Forschungsergebnisse übersichtlich dar, die eine wissenschaftliche Begutachtung (»Peer Review«) durchlaufen haben. Die Originalfas-

sungen der Artikel werden zum intensiven Nachlesen immer verlinkt.

In der Rubrik **[KAMO.INFO]** informieren wir Sie über interessante Themen aus dem Mobilitätsbereich in der Region. In dieser Ausgabe stellen wir interessante Veranstaltungen von und mit KAMO vor.

Nun fragen Sie sich, wofür KAMO eigentlich steht? Karlsruhe Mobility! Was sich genau dahinter verbirgt, erfahren Sie auf Seite 8.

Mit diesen kurzen einleitenden Worten wünschen wir Ihnen nun viel Spaß und interessante Einblicke bei der Lektüre unserer ersten Ausgabe! ■

Miriam Ruf & Matthias Vollat



→ 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 Erstausgabe:

<https://www.kamo.one/magazin-feedback1/>





**Abb. 1:** Mit dem neuen Namen und Logo, die im Kreis der Partner und Koordinatoren erarbeitet wurden, knüpft »KAMO« auch an die bisherige Marke des Leistungszentrums »Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe« an – ist jetzt aber auch tauglich für internationale Auftritte und Texte mit Zeichenbegrenzung.



PROFILREGION  
MOBILITÄTSSYSTEME  
KARLSRUHE

[KAMO.INFO]

Jens Ziehn (Fraunhofer IOSB), Leiter des KAMO-Forschungsfelds »Digitalisierung«

# Editorial



**Titelthema: Der digitale Zwilling unserer Mobilität – Wie virtuelle Welten innovative Ideen schneller und sicherer in Verkehr bringen.**

Unsere Mobilität entwickelt sich mit zunehmender Geschwindigkeit weiter, und gewinnt dabei stetig an Komplexität – aus technischer ebenso wie aus gesellschaftlicher und politischer Sicht.

Um Innovationen schneller und sicherer in den Verkehr zu bringen, findet die Entwicklung und Erprobung von Technologien längst nicht mehr nur in der Realität statt. Digitale Modelle der Mobilität werden immer wichtiger, und das entlang aller Entwicklungsstufen und auf allen Ebenen: Von der detaillierten Betrachtung von Motorkomponenten über Steuergeräte im Fahrzeug bis hin zur Gesamtbeurteilung der Mobilität von Städten und Ländern. Damit wird die komplexe Mobilität greifbar für computergestützte Entwicklungsansätze und künstliche Intelligenz (KI). Gute Modelle reduzieren Testaufwände in der Wirklichkeit, und machen schwierige Zusammenhänge analysierbar.

Dabei gibt es vielfältige Ansätze, je nachdem, welcher Teil der Mobilität beschrieben werden soll, und vor allem: zu welchem Zweck. Entsprechend wird zu diesem Thema an den Karlsruher Forschungseinrichtungen intensiv und breit geforscht und entwickelt – und entsprechend widmen wir diesem Thema die erste Ausgabe des KAMO-Magazins.

In dieser Ausgabe werfen wir in der Rubrik **[PROJEKT.EINBLICK]** einen Blick hinter die Kulissen von zwei Forschungsprojekten aus dem KAMO-Forschungsfeld »Digitalisierung«, die sich mit digitalen Abbildern der Mobilität befassen, aber aus völlig unterschiedlicher Perspektive: Einmal zur Verbesserung nachhaltiger, »intermodaler« Mobilität mithilfe von KI (S. 24), unter anderem in der KVV.regiomove-App; und einmal mit dem Ziel, autonome Straßenfahrzeuge in Simulationen realistischer erproben zu können (S. 10).

Die methodischen Grundlagen dafür liefern Ergebnisse aus der Forschung. Forschungspublikationen, die die wissenschaftliche Begutachtung, das sogenannte »Peer-Review« erfolgreich durchlaufen haben, sind Kandidaten für unsere Rubrik **[FORSCHUNG.KOMPAKT]**. Hier stellen Ihnen die Autorinnen und Autoren entsprechender Artikel die Kernaussagen ihrer Arbeiten noch einmal prägnant und nachvollziehbar dar. Passend zum Titelthema der Ausgabe schauen wir uns an, wie die Karlsruher Forschenden ihre jeweiligen Forschungsgegenstände in digitalen Abbildern entwickeln, erproben und bewerten – vom Verbrennungsprozess eines Otto-Motors wenn er statt Benzin mit Wasserstoff betrieben wird (S. 44), über Motoremissionen dank eines »lernfähigen« Simulationsmodells (S. 58), bis zu ganzen Flotten von vernetzten Fahrzeugen (S. 30).

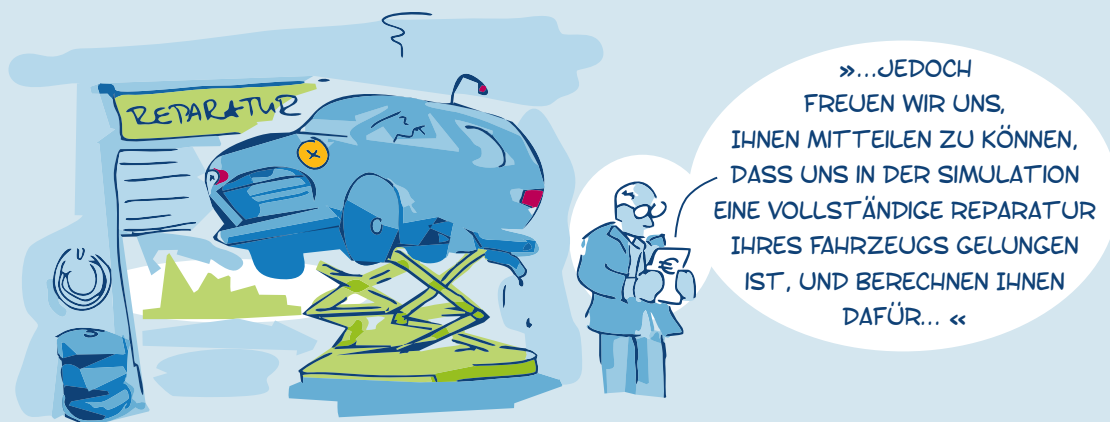
Was die Arbeiten über das Titelthema »Digitaler Zwilling« hinaus zusammenhält – nämlich der Rahmen »Karlsruhe Mobility« – ist auf Seite 8 zu lesen.

Wir hoffen, dass Sie damit spannende und relevante Einblicke in ein hochaktuelles Forschungsthema der Mobilität erhalten. ■

Mit den besten Grüßen aus Karlsruhe

Jens Ziehn





SIMULATIONSANSÄTZE IN DER AUTOMOBILBRANCHE: WIRD DIE REALITÄT SCHRITT HALTEN KÖNNEN?<sup>1</sup>

→ In dieser Ausgabe

<b>[KAMO.INFO]</b> – In eigener Sache (1/2)	3
Liebe Leserinnen und Leser,	4
Editorial	6
Was ist »Karlsruhe Mobility«?	8
<b>[PROJEKT.EINBLICK]</b> – Wie erzeugen Projekte in und aus Karlsruhe digitale Abbilder der Welt?	9
Wie beweist man die Sicherheit autonomer Fahrzeuge, bevor man sie in den Verkehr bringt?	10
Wie bringen uns Künstliche Intelligenz und Daten nahtlos und nachhaltig ans Ziel?	24
<b>[FORSCHUNG.KOMPAKT]</b> – Wissenschaftlich geprüfte Forschungsergebnisse greifbar aufbereitet	28
Sind höfliche autonome Autos auch gut für den Verkehrsfluss?	30
Anpassung eines Einzylinder-Ottomotors für den Wasserstoffbetrieb und maximale Effizienz	44
Modellierung der Emissionen eines Benzinmotors während hochdynamischen Betriebs durch maschinelles Lernen	58
<b>[KAMO.INFO]</b> – In eigener Sache (2/2)	64
Veranstaltungen	66

<sup>1</sup> AUF AUSDRÜCKLICHEN WUNSCH WEISEN WIR DARAUF HIN, DASS DIE KARIKATUR HUMORVOLL GEMEINT IST, UND IN KEINER WEISE EINE AKKURATE DARSTELLUNG DER ARBEITSPRAXIS IN DEUTSCHEN AUTOWERKSTÄTTEN LEISTEN SOLL.



# Was ist »Karlsruhe Mobility«?



**In Karlsruhe und Baden-Württemberg hat innovative Mobilitätsentwicklung durch das Zusammenwirken von universitärer und außeruniversitärer Forschung, Industrie und Wirtschaft, Betreibern, öffentlichen Stellen und Gesellschaft eine lange Tradition. Hier können die Mobilitätstechnologien von morgen nicht nur vorgedacht, sondern mit starken Partnern umgesetzt, erprobt und in die praktische Anwendung gebracht werden. Die Initiative KAMO: Karlsruhe Mobility stellt einen zentralen Anlaufpunkt dar für regionale, überregionale und internationale Partner, die mit oder in Karlsruhe die Mobilität von morgen gestalten möchten.**

Mobilität verbindet Menschen, Branchen und Disziplinen wie kaum ein anderes Thema. Entsprechend braucht die Umsetzung neuer Lösungen ein breites Fundament. In Karlsruhe gibt es eine langjährige, vertrauensvolle Zusammenarbeit der unterschiedlichsten Akteure in dem Bereich, die durch gezielte Initiativen in den vergangenen Jahren systematisch ausgebaut und gestärkt wurde. Zu diesen Initiativen zählen unter anderem die TechnologieRegion Karlsruhe und das mit ihr verbundene Karlsruhe Mobility Lab, die UITP-Karlsruhe Mobility Innovation Partnership mit dem UITP Regional Training Centre Karlsruhe sowie das Leistungszentrum Karlsruhe Mobility High Performance Center<sup>1</sup> als Zusammenschluss der Karlsruher Institutionen für Forschung, Lehre und Transfer.

## **Das Karlsruhe Mobility Lab...**

... ist ein weltweit anerkanntes Zentrum für die Entwicklung von intelligenten Konzepten für die urbane und regionale Mobilität der Zukunft. Ein wesentlicher Schwerpunkt seines Innovationsstrebens liegt

<sup>1</sup> Das Leistungszentrum Karlsruhe Mobility High Performance Center ist eine nichtrechtsfähige Kooperation der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., des Karlsruher Instituts für Technologie, des FZI Forschungszentrums Informatik und der Hochschule Karlsruhe. Das Leistungszentrum Karlsruhe Mobility High Performance Center nimmt als solches nicht am Rechtsverkehr teil. Verträge im Zusammenhang mit dem Leistungszentrum werden ausschließlich von einem der Kooperationspartner im eigenen Namen geschlossen.

dabei auf der Weiterentwicklung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) und der Entwicklung neuer Mobilitätskonzepte – beides wesentliche Bausteine der Mobilitätswende. In einem einzigartigen Ökosystem arbeiten Wissenschaft, Wirtschaft, öffentliche Hand und innovative Verkehrsunternehmen gemeinsam an interdisziplinären Ansätzen. Die Mobilitäts- und Technologieregion Karlsruhe ist damit ein Vorreiter in Sachen nachhaltiger Mobilitätsentwicklung.

## **Die in der Form einzigartige UITP-Karlsruhe Mobility Innovation Partnership...**

... zwischen dem Weltverband für öffentliches Verkehrswesen (UITP) und der TechnologieRegion Karlsruhe wird durch die gebündelten Kräfte regionaler Mobilitätsexperten aus Wirtschaft, Wissenschaft und öffentlichen Institutionen getragen. Untermauert wird die Partnerschaft mit einem TRK-UITP Verbindungsbüro in Karlsruhe, das ebenso ein Novum darstellt wie das regionale UITP Regional Training Centre Karlsruhe. Dreimal im Jahr bietet das regionale Schulungszentrum Karlsruhe der UITP Trainingsprogramme für Mitarbeiter des öffentlichen Verkehrs in Karlsruhe an. Diese Programme sind unter anderem: Ticketing, Busplanung und Disposition, Cybersicherheit, Automatisierte Mobilität und Mobilität als Dienstleistung.

**Das Leistungszentrum Karlsruhe Mobility High Performance Center...**

... ist der Zusammenschluss der Karlsruher Institutionen für Forschung, Lehre und Transfer. Seit der Gründung 2016 ist das Leistungszentrum 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. Die Förderung dafür haben seither das Land Baden-Württemberg sowie die Fraunhofer-Gesellschaft übernommen. Dabei war immer das Ziel, der Zukunft stets ein paar Schritte voraus zu sein, mit exzellenter, preisgekrönter Forschung und niederschweligen und flexiblen Entwicklungsansätzen, um die Herausforderungen der Mobilitätstransformation mit all ihren Facetten zu beleuchten.

Damals gestartet unter dem Namen Leistungszentrum Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe möchten wir nun einige grundsätzliche Weichen für die kommenden Jahre stellen: Aus der »Profilregion« wird Karlsruhe Mobility als griffigerer Name, der regional und überregional verstanden wird, und mit einem neuen Auftritt, der es erleichtern soll, direkter mit den richtigen AnsprechpartnerInnen in Kontakt zu treten. Und auch sonst bleibt alles beim Neuen: Unsere Forscherinnen und Forscher stehen als Ansprechpartner für Mobilitätsthemen bereit, ob technologische Entwicklungen oder Erprobungen, Studien, Datenbereitstellung, Beratung oder Aus- und Fortbildung.

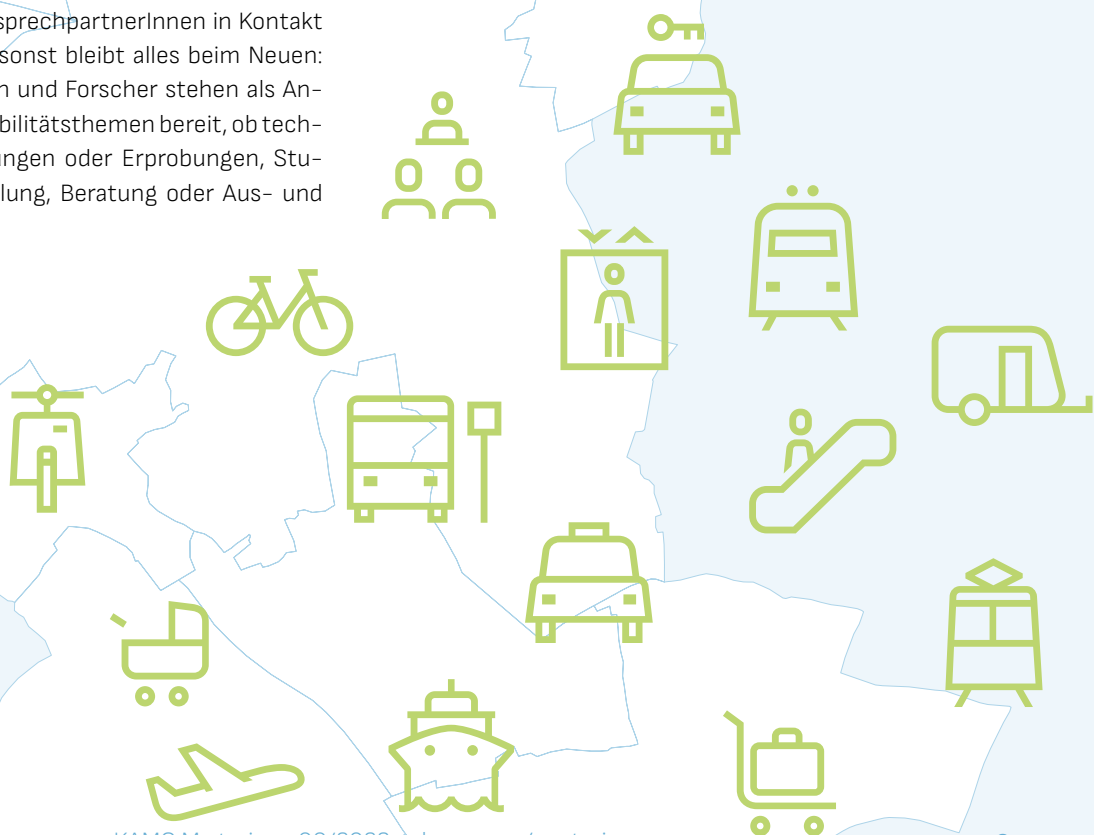
**Unter dem Dach KAMO: Karlsruhe Mobility...**

... sollen diese Initiativen ab 2023 zusammenfließen und einen zentralen Anlaufpunkt für Mobilitätsfragestellungen insbesondere im Umfeld Forschung und Entwicklung darstellen.

Wenn Sie Partner für Forschungs- und Entwicklungsprojekte suchen, unsere Infrastruktur- oder Weiterbildungsangebote für sich oder Mitarbeitende nutzen, sich vernetzen oder ihre Entwicklungen in einem innovationsoffenen Umfeld in die Anwendung bringen möchten, freuen wir uns, wenn Sie mit uns Kontakt aufnehmen. Alternativ besuchen Sie uns doch auf einer unserer Veranstaltungen, wie auf Seite 66 aufgeführt, oder unserer Web-Präsenz **kamo.one**.

Und um immer auf dem neuesten Stand zu sein, was in und um Karlsruhe im Bereich Mobilität geforscht, entwickelt und umgesetzt wird, bleiben Sie Leserin oder Leser unseres KAMO.Magazins, das nach dieser Erstausgabe zunächst zweimal pro Jahr erscheinen soll, und online unter **kamo.one/magazin** abrufbar ist. Für schnellere und kürzere Updates folgen Sie außerdem gern unserem LinkedIn-Social-Media-Kanal **linkedin.com/company/kamo**.

Wir freuen uns, die Mobilität von morgen mit Ihnen gemeinsam zu entwickeln! ■





[PROJEKT.EINBLICK]

# Wie beweist man die Sicherheit autonomer Fahrzeuge, bevor man sie in den Verkehr bringt?



Wann vollständig fahrerlose Fahrzeuge in Deutschland und Europa Wirklichkeit werden, hängt nicht nur von der Entwicklung der Fahrzeugtechnologien selbst ab: Hersteller, Zulieferer, Prüforganisationen und öffentliche Stellen stehen vor der Frage, wie man ein ausreichend sicheres System von einem unsicheren System unterscheiden kann, bevor man es in den Verkehr bringt. Das Paradoxon: Weil autonome Fahrfunktionen mittlerweile so sicher fahren, wird es immer schwieriger, ihre Schwächen in realen Testfahrten zu finden. Das Sicherheitsniveau eines Menschen gilt bereits als nicht mehr wirtschaftlich durch Realfahrten erprobbar. Aber wenn Simulationen diese Lücke schließen wollen, müssen sie noch deutlich an Realismus gewinnen – und diesen vor allem auch nachweisen können.

Automatisierte Fahrzeuge werden immer komplexer – und ebenso die Umgebungen, in denen sie sich bewegen. Mit der Markteinführung der sogenannten »dritten Stufe der Automatisierung« nach SAE und VDA muss nun auch der Mensch die Fahrfunktion nicht mehr durchgängig überwachen.

Im Ernstfall muss also die künstliche Intelligenz vollständig allein reagieren, und kritische Situationen auflösen. Ob sie dazu in der Lage ist, oder ob ihr Fehler unterlaufen, erprobt man besser nicht ausführlich im Realverkehr. Welche Alternativen das AVEAS-Projekt eröffnen soll, erklären die Partner im Interview.



Realistischere Simulationen zu erzeugen, in denen künftige automatisierte Fahrfunktionen ihre Sicherheit nachweisen sollen, mithilfe gezielter Erhebung und Auswertung von Realdaten – das ist das Ziel des AVEAS-Projekts. Dazu erheben die Partner mit Versuchsfahrzeugen, Infrarotkameras und Laserscannern an Kreuzungen, sowie Ultraleichtflugzeugen den fließenden Verkehr – insbesondere an Unfallschwerpunkten an den Standorten Karlsruhe, Dresden und Paderborn. KI-gestützte Verfahren erkennen Verkehrsteilnehmer und ihre Bewegungen, und erzeugen daraus anonymisierte Szenario-Zeitreihen. Aus diesen werden dann unter anderem Verhaltensmodelle für Simulationen erzeugt, mithilfe von Optimierungsverfahren und maschinellem Lernen. Im Erfolgsfall soll die Methodik ausgedehnt und dauerhaft betrieben werden, um die komplexe Wirklichkeit immer umfassender in der Simulation abzubilden. Wie gut die neuen, *datengetriebenen* Simulationen sind um Fahrzeugfunktionen auf Schwachpunkte abzutasten, wird ganz praktisch ausprobiert: Drei prototypische Funktionen werden in der bevorstehenden Projektphase in den entwickelten Simulationen erprobt, und die Ergebnisse mit der Realität abgeglichen.

Ob das schon das Ende der realen Testfahrten von fahrerlosen Autos einläutet, oder nur einer von vielen Bausteinen im komplexen Entwicklungs- und Absicherungsprozess sein wird, fragen wir die Projektpartner in unserem Interview. <sup>1</sup>

*Hallo zusammen, gehen wir zuerst mal der Reihe nach durch: Was ist euer Hintergrund und wie seid ihr zu dem Projekt gekommen?*

**Janina Stompe (UAI):** Ich bin Mathematikerin. Ich habe 2017 am KIT in angewandter Mathematik promoviert. Danach habe ich fast vier Jahre am Fraunhofer IOSB unterschiedlichste Forschungsprojekte bearbeitet und geleitet, insbesondere im Maschinellen Lernen für die Produktion, aber auch im autonomen Fahren. Seit Juni 2022 bin ich bei *understand.ai*, weiterhin in der Projektleitung geförderter Forschungsprojekte. UAI ist Konsortialführer des AVEAS-Projekts, und so kam ich auch hier zu der Projektleitung.

**Philipp Renner (UAI):** Und ich bin seit 2019 bei UAI im Bereich Technical Sales und Solution Engineering. Den Großteil meiner Zeit verbringe ich also damit, die Anforderungen unserer Kunden zu verstehen und gezielt Lösungsansätze für sie zu entwi-

<sup>1</sup> Aus Platzgründen können wir nur eine gekürzte Version veröffentlichen – die vollständigen Antworten werden nach und nach über die LinkedIn-Seite des Projekts veröffentlicht: <https://www.linkedin.com/company/aveas-projekt>

### → Das AVEAS-Projekt

Das AVEAS-Projekt (Absicherungsrelevante Verkehrssituationen erheben, analysieren, simulieren) ist 2021 mit Förderung des **Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz** (BMWK) und einem Gesamtbudget von über 10 Mio. € gestartet. Es wird geleitet vom Karlsruher Unternehmen **understand.ai**, und verbindet nicht nur die KAMO-Partner **PTV GmbH**, **KIT** und **Fraunhofer IOSB**:

Aus Baden-Württemberg beteiligen sich die **Porsche Engineering Group** und die **GOTECH GmbH** aus Weissach, die **EDI GmbH** aus Karlsruhe, das **Fraunhofer EMI** in Freiburg, sowie der **ADAC Württemberg** und das **Polizeipräsidium Karlsruhe**.

Aus Deutschland sind die **dSPACE GmbH**, die **Continental Automotive GmbH**, das **Allianz Zentrum für Technik** in Ismaning bei München, das **Spiegel Institut Ingolstadt**, der **TÜV Süd** in München sowie **ASAM e.V.** am Projekt beteiligt, sowie das **Fraunhofer IVI** in Dresden.

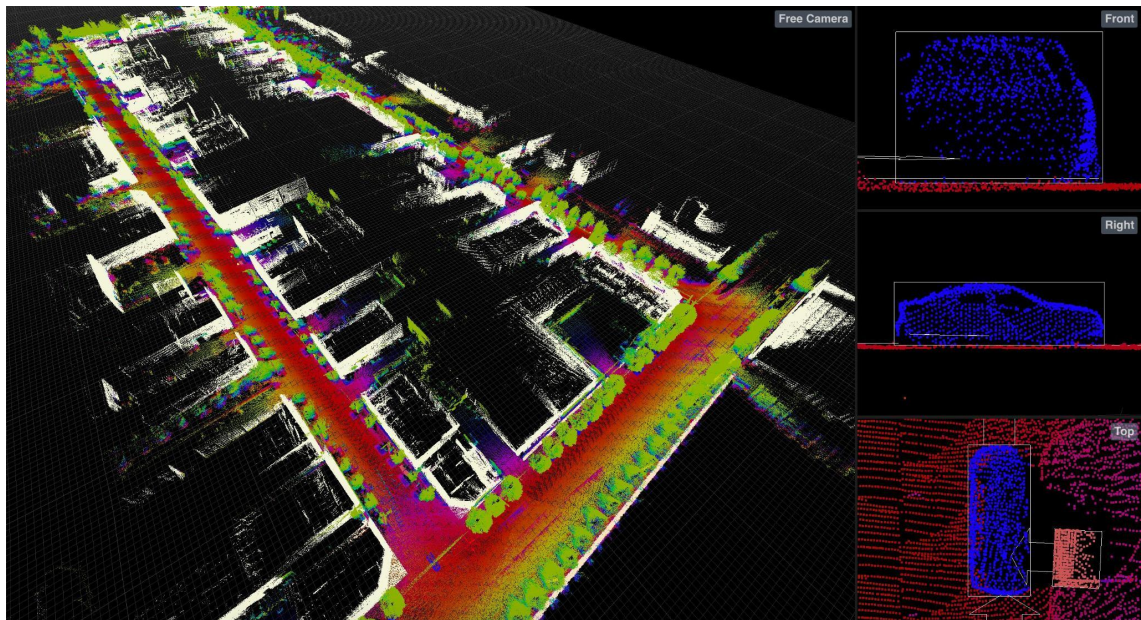
International kooperiert das Projekt unter anderem mit dem österreichischen Testfeld **ALP.Lab**.

Laufzeit	01.12.2021 – 30.11.2024
Budget	10,0 Mio. EUR
Förderung	6,2 Mio. EUR
Fördergeber	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
Förderpartner	12
Website	<a href="https://aveas.org">https://aveas.org</a>

ckeln. Damit habe ich mich über die letzten Jahre intensiv mit autonomem Fahren beschäftigt und kann Projekte in diesem Bereich ganzheitlich von technischer Seite betreuen, wenn es um die Aufnahme und Verarbeitung von Trainings- und Validierungsdaten verschiedener Sensoren geht, insbesondere bei der Annotation.

**Mohamad El-Haji (EDI):** Wir waren seit der initialen Planung von AVEAS am Projekt beteiligt. Unsere Firma ist ein Spin-off des KIT, aus der ursprünglichen Forschergruppe sind die Gründer der EDI GmbH geworden. Das Ziel unserer Forschung war es, die Entwicklung neuer Fahrzeugfunktionen durch rechnerunterstützte Validierung zu beschleunigen. Diesem Ziel widmet sich auch unsere Firma seit der Gründung 2015, insbesondere beim autonomen Fahren.

**Jens Ziehn (Fh-IOSB):** Ich habe Informatik in Hannover studiert, bin jetzt seit gut zehn Jahren am IOSB und leite die Gruppe »Automotive und Simulation«, in der wir unter anderem die offene Simulationsplattform OCTANE entwickeln, die auch im AVEAS-Projekt eine Rolle spielt.



**Abb. 1:** Die Erhebung und automatisierte Auswertung von realen Verkehrssituationen ist ein wesentlicher Projektpfeiler – wie hier bei der Auswertung von Laserscanner-Punktwolken durch den Konsortialführer *understand.ai GmbH*.

**Daniel Stadler (Fh-IOSB):** Ich bin auch am IO SB, aber aus Jens' Nachbarabteilung Videoauswertesysteme. Nach meinem Masterstudium in Elektrotechnik am KIT habe ich meine Promotion am Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme (IES) am KIT begonnen, der in enger Kooperation mit dem Fraunhofer IO SB arbeitet. Dort arbeite ich in verschiedenen Projekten mit, unter anderem auch in AVEAS.

**Florian Lüttner (Fh-EMI):** Ich bin Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer EMI in Freiburg. Seit etwa drei Jahren arbeite ich in der Abteilung Sicherheit und Resilienz technischer Systeme an realistischen Verkehrsflusssimulation und der Bewertbarkeit von Straßenverkehr bezüglich der Kritikalität. Wir am EMI haben unter anderem zum Ziel, durch Optimierungsverfahren möglichst realistisches Fahrverhalten in agentenbasierten, mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen abbilden zu können, sowie Fahrscenarien bezüglich ihrer Kritikalität bewertbar zu machen. Diese Ideen flossen in die Projektskizze ein und bilden einen zentralen Bestandteil des Projekts.

**Maria Pohle (Fh-IVI):** Am Fraunhofer IVI arbeite ich seit 2018 in der Gruppe Fahrzeug- und Verkehrssicherheit. Studiert habe ich Verkehrsingenieurwesen in Dresden und arbeite seit etwa zwölf Jahren im Bereich der Unfallforschung. Ich widme mich im Besonderen der Modellierung des Einflusses der Verkehrsinfrastruktur auf das Verkehrsverhalten und die Verkehrssicherheit. Das Fraunhofer IVI unterstützt das Projekt durch seine langjährige Erfahrung

in der Erstellung von Unfallszenarien aus Infrarotaufnahmen, deren Kritikalitäts- und Repräsentativitätsbewertung und die Überführung in ein harmonisiertes Datenformat.

**Matthias Pfriem (PTV):** Ich bin bei der PTV als Produktmanager für unsere mikroskopische Verkehrssimulation PTV Vissim verantwortlich. Vor meinem Wechsel zur PTV war ich über ein Jahrzehnt am Institut für Fahrzeugsystemtechnik am KIT in verschiedenen Rollen in der Mobilitätsforschung aktiv. Die PTV habe ich hier immer wieder als Industriepartner in den Forschungsprojekten kennen und schätzen gelernt. Als Gründung aus der Karlsruher Uni gibt es hier immer enge Bande. Und da die PTV eine sehr wissensaffine Organisation ist, die nicht nur das Fachwissen zur Softwareentwicklung, sondern auch das Domänenwissen unserer Anwender bündeln möchte, gab es für mich ein Angebot, dass ich dieses Gesamtbild mit einer stärkeren fahrzeugtechnischen Perspektive erweitern könnte.

**Henrik Gommel (GOTECH):** Nach meinem Studium des Wirtschaftsingenieurwesens in Hamburg habe ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Fraunhofer Austria und an der TU Wien im Bereich Operations Management gearbeitet und in diesem Umfeld promoviert. Inzwischen habe ich die geschäftsführenden Aufgaben bei der GOTECH Fahrzeugentwicklungs- und Konstruktionsgesellschaft mbH mit Sitz in Weissach übernommen – das Unternehmen wurde vor über 25 Jahren gegründet. Zum Projekt sind wir durch den Austausch rund





Nach Beispielrechnungen müssten über 6 Mrd. km auf einer Autobahn zurückgelegt werden, um nachzuweisen, dass ein Autobahnpilot sicherer fährt als ein Mensch. Das liegt einfach daran, dass es – glücklicherweise – relativ wenige Unfälle gibt, an denen man Fahrzeuge testen könnte. Simulationen können diese Lücke schließen.«

Dr. Janina Stompe, [understand.ai](https://www.understand.ai)

um unsere eigenentwickelte Fahrsimulationsumgebung gekommen. Virtual-Reality-basiert können wir damit Neuentwicklungen rund um das Interieur in Fahrzeugen erproben. Auf Basis der mitunter von uns als Entwicklungsdienstleister generierten CAD-Modelle können wir bereits in frühen Entwicklungsphasen, in denen vorwiegend nur 3D-Daten und keine physischen Prototypen vorliegen, ein realitätsnahes Erprobungsumfeld inklusive Fahrphysik bieten.

**Martin Lauer (KIT-MRT):** Ich arbeite als wissenschaftlicher Gruppenleiter seit 15 Jahren am KIT an Themen zum autonomen Fahren. Nachdem in den letzten Jahren viele Technologien zum autonomen Fahren entwickelt wurden, wird es jetzt immer wichtiger, diese Technologie sicher zu machen, gerade in schwierigen und ungewöhnlichen Situationen. Genau solche Situationen werden im Projekt AVEAS modelliert und mit Sensoren erfasst, daher ist das Projekt für mich interessant.

*Laut Projektbeschreibung ist das Ziel, Daten zu erheben für die Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen in der Simulation. Welche Rolle spielen Daten im Bereich der Absicherung?*

**Janina Stompe (UAI):** Um auf das Thema Daten zu kommen, muss ich etwas ausholen: Für automatisiertes Fahren, bzw. für die Absicherung automatisierter Fahrfunktionen, werden Simulationen immer wichtiger. Denn für eine reale Erprobung müssten, nach Beispielrechnungen, über 6 Mrd. Test-Kilometer auf einer Autobahn zurückgelegt werden. Erst dann könnte man nachweisen, dass ein Autobahnpilot sicherer fährt als ein Mensch. Das liegt einfach daran, dass es – glücklicherweise – relativ wenige Unfälle oder kritische Situationen gibt, an denen

man Fahrzeuge testen könnte. Simulationen können diese Lücke schließen. Situationen können erprobt, wiederholt und variiert werden. Und das auch ohne reales Risiko.

Damit dieser Ansatz eben auch zielführend ist, müssen Realdaten erhoben werden. Auf diesen bauen die Simulationen auf. In AVEAS arbeiten wir deshalb mitunter an gezielten und wohlüberlegten Realdatenaufnahmen an Unfallhäufungspunkten.

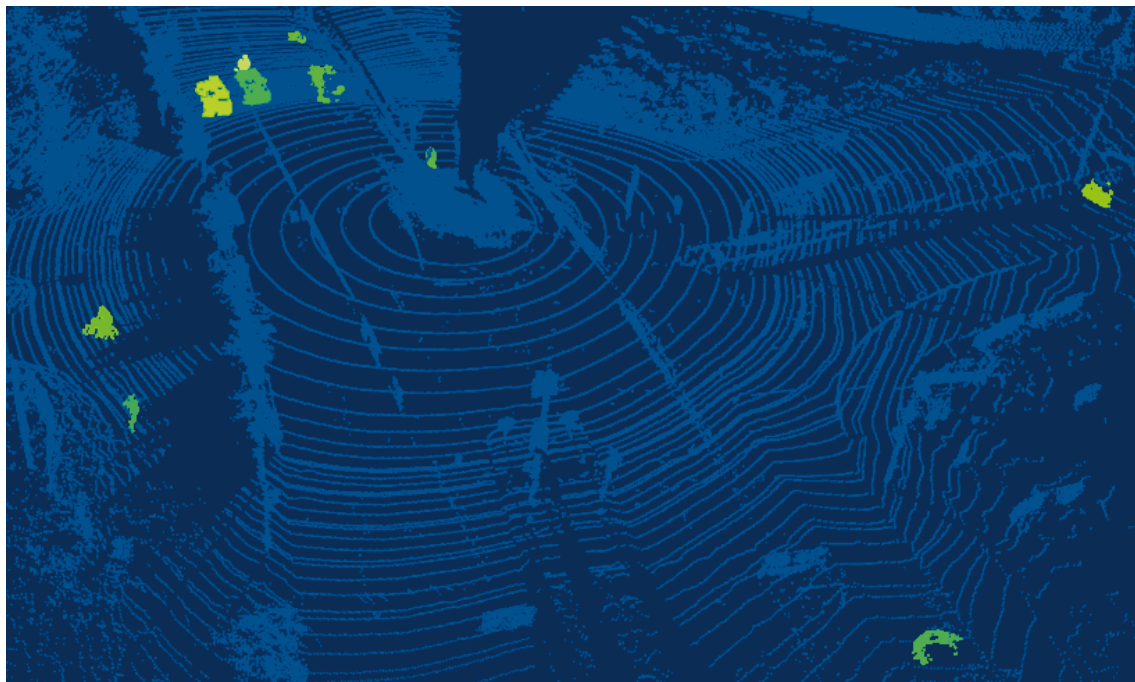
Interessant ist hierbei auch, dass sinnvolle Daten in diesem Zusammenhang nicht gleich Unfälle sein müssen. Es gibt viele Beinahe-Unfälle, und gerade diese sind interessant. Denn aus einem Beinahe-Unfall kann schnell ein Unfall werden, wenn der Fahrer nur kurz unkonzentriert ist. Nehmen wir beispielsweise riskante Einschermanöver oder dichtes Auffahren. Das kommt häufig vor und bildet eine sehr gute Basis für Simulationen.

**Daniel Stadler (Fh-IOSB):** Viele Module moderner Systeme, wie auch die eines autonomen Fahrzeugs, arbeiten datengetrieben. Durch eine Vielzahl an Beispieldaten lernt ein KI-basiertes System eine gewisse Aufgabe, beispielsweise die Erkennung von Fußgängern oder auch die Detektion von Fahrzeugen in Luftbildern. Hierbei ist es wichtig, dass die erhobenen Daten die Realität möglichst gut widerspiegeln. Sonst kann es passieren, dass das System im realen Einsatz in eine unbekannte Situation gerät, mit der es nicht umgehen kann, was es unbedingt zu vermeiden gilt. Daten spielen also eine immens wichtige Rolle bei der Absicherung.

**Martin Lauer (KIT-MRT):** Daten sind ein ganz wichtiges Element der Absicherung. Die heutigen Technologien, zum Beispiel aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz, sind so komplex, dass kein Mensch sie mehr vollständig verstehen und durchdringen kann. Daher ist es erforderlich, sie auf die Probe zu stellen und zu überprüfen, ob sie mit den besonders herausfordernden Situationen zurecht kommen. Und dazu benötigen wir Daten, die solche Situationen beschreiben – etwa Daten von Fahrzeugkameras unter schwierigen Sichtverhältnissen oder Daten von ungewöhnlichen Bewegungen und Fahrmanövern verschiedener Verkehrsteilnehmer.

*Und wie kommt man an »wertvolle Daten«?*

**Janina Stompe (UAI):** Das ist ein schwieriges Thema. Wir haben im Vorfeld beispielsweise mit dem Polizeipräsidium Karlsruhe Unfallhäufungsschwerpunkte herausgefiltert und so unsere Schwerpunkte für die Datenerhebung gelegt. Ob wir diese Straßenabschnitte, Kreuzungen und Autobahnabschnit-



**Abb. 2:** Die Erhebung an Kreuzungen durch das KIT nutzt Laserscanner um die Verkehrssituation dreidimensional und hochgenau zu erfassen. In den entstehenden Punktwolken werden Verkehrsteilnehmer erkannt und ihre Bewegungen datenschutzsicher verfolgt.

te nochmal ändern müssen, wird sich im Laufe des Projektes zeigen.

**Maria Pohle (Fh-IVI):** Wichtig bei der Frage nach »wertvollen Daten« ist, bereits im Vorfeld zu wissen, welche Verkehrssituationen einen interessieren. Wir untersuchen dazu zunächst polizeiliche Unfalldaten in unserer Datenbank und filtern relevante Parameterausprägungen. Ergeben sich dabei örtliche Häufungen, kann davon ausgegangen werden, dass an dieser Stelle durch Verkehrsbeobachtungen relevante Situationen erhoben werden können. Wir nutzen dazu Infrarotkameras, da sie auch bei Nacht aufnehmen können und nativ anonym sind, da Kennzeichen und Gesichter nicht erkennbar sind. Aus den Aufnahmen können durch eine automatisierte Prozessierung Objekte erkannt werden und deren Bewegung über die Zeit aus den Bildsequenzen abgeleitet werden.

**Martin Lauer (KIT-MRT):** Wir wiederum nutzen an Kreuzungen LiDAR-Sensoren, um das Verkehrsgeschehen zu beobachten. LiDAR sind Sensoren basierend auf Lasertechnik, mit denen das Verkehrsgeschehen sehr genau in dreidimensionaler Sicht beobachtet werden kann. Aus den Daten der LiDAR werden automatisch Objekte wie Fahrzeuge, Fußgänger oder Fahrradfahrer erkannt und deren Bewegung verfolgt. Dadurch können wir Bewegungsabfolgen einzelner Verkehrsteilnehmer sowie das Zusammenspiel mehrerer Verkehrsteilnehmer erfassen.

**Florian Lüttner (Fh-EMI):** Die relevanten Daten und Metriken zu identifizieren ist auch Teil des Projekts, und hängt davon ab, für was man diese Daten verwenden möchte. Interessiert man sich für die eher seltenen kritischen Szenarien, bilden klassische Metriken wie eine Time-to-Collision<sup>2</sup> eine Möglichkeit. Hier gibt es zahlreiche weitere. Allerdings greifen diese oft nur von außen beobachtbare Dimensionen auf. Kenntnisse über das Innere des Fahrzeugs fehlen in diesen Bewertungen. Diese zu beobachten, ist ebenfalls Teil des Projekts.

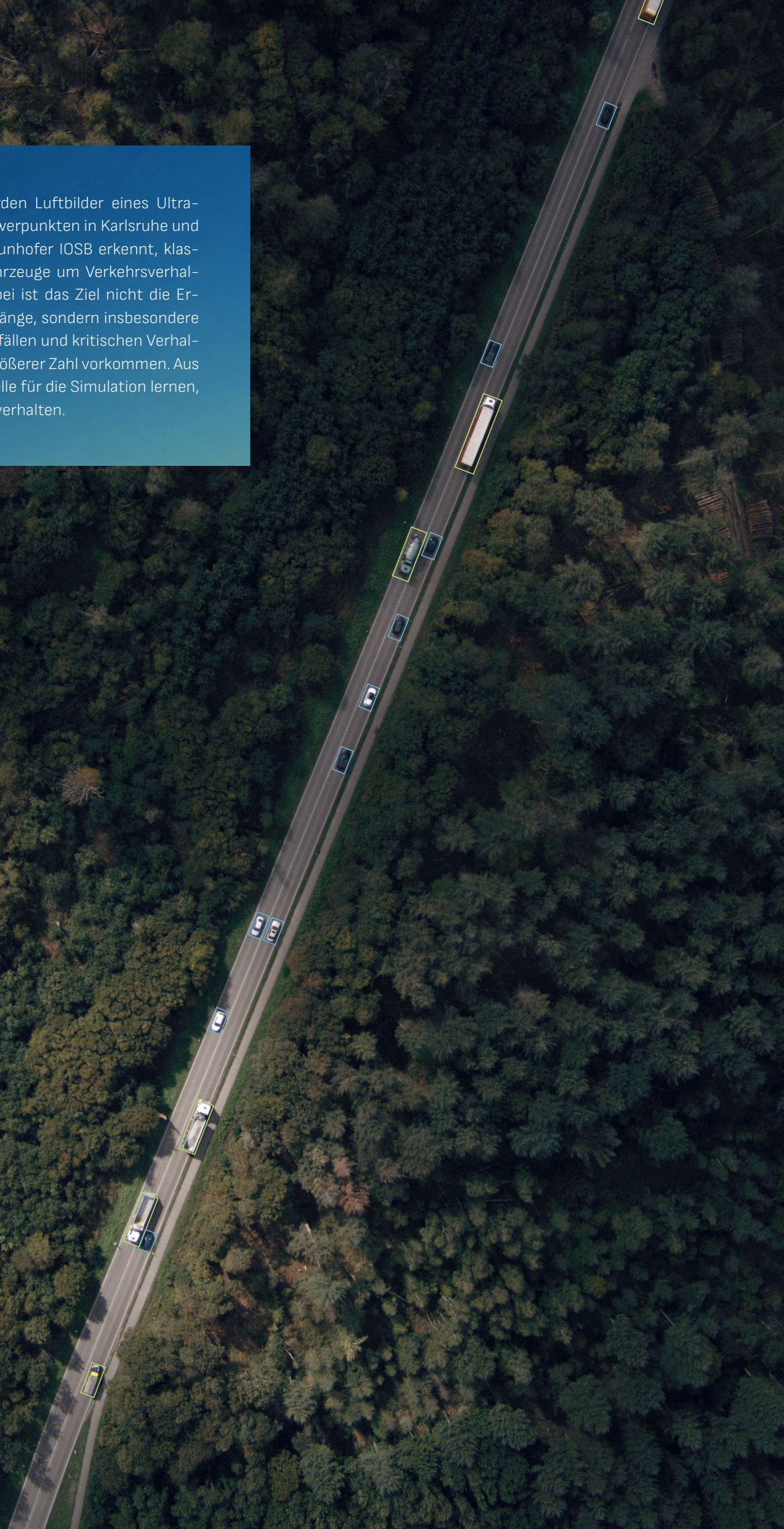
#### *Welche Rolle spielt der Datenschutz?*

**Jens Ziehn (Fh-IOSB):** Wir haben im Projekt eine enge Abstimmung mit dem Landesbeauftragten für Datenschutz und Informationsfreiheit Baden-Württemberg und dem zentralen juristischen Dienst der Stadt Karlsruhe gesucht, und die Erhebungsmethoden detailliert aufgeschlüsselt und diskutiert. Dabei haben wir auch an mehreren Stellen konkrete technische und organisatorische Vorgaben bekommen, die einzuhalten waren. Aber das waren immer sehr konstruktive und lösungsorientierte Diskussionen, und wir möchten mit dem Projekt auch zeigen: Datenschutz und innovative, datengetriebene For-

<sup>2</sup> In Verkehrssituationen die hypothetische Zeit, bis zwei Fahrzeuge kollidieren würden, wenn keines der beiden Geschwindigkeit oder Fahrtrichtung ändert. Die sogenannte TTC kann damit auch bei Beinaheunfällen berechnet werden, und ist dort entsprechend niedrig.



**Abb. 3:** Unter anderem werden Luftbilder eines Ultraleichtflugzeugs an Unfallschwerpunkten in Karlsruhe und Umgebung genutzt. Das Fraunhofer IOSB erkennt, klassifiziert und trackt darin Fahrzeuge um Verkehrsverhaltensdaten zu gewinnen. Dabei ist das Ziel nicht die Erhebung konkreter Unfallhergänge, sondern insbesondere die Erhebung von Beinaheunfällen und kritischen Verhaltensweisen, die in deutlich größerer Zahl vorkommen. Aus ihnen sollen Verhaltensmodelle für die Simulation lernen, sich menschenähnlicher zu verhalten.





schung schließen sich nicht aus. Die für uns wichtigen Daten sind weder Nummernschilder noch Gesichter. Sicherzustellen, dass solche personenbezogenen Informationen nicht als »Beifang« mit erhoben werden, ist teilweise bewusster Aufwand, aber häufiger praktisch machbar als manchmal vermutet wird – wenn man es versucht.

*Das Projekt hat kürzlich die Halbzeit überschritten. Wie ist der Stand der Dinge? Läuft alles nach Plan?*

**Janina Stompe (UAI):** Wir sind gut vorangekommen: Wir haben Erhebungskampagnen an mehreren Unfall Schwerpunkten in Karlsruhe, Dresden und Paderborn erfolgreich abgeschlossen, ebenso wie die ersten Probandenstudien. Die unterschiedlichen Verarbeitungsketten für Luftbilddaten, Fahrzeugdaten und stationärer Infrastruktur liefern gute Ergebnisse. Auf der IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) werden wir im September in Bilbao unsere Zwischenergebnisse in mehreren Fachpapieren vorstellen. Wir sind gerade dabei, das gemeinsame Datenformat basierend auf dem ASAM-Standard OpenLABEL final zu spezifizieren. Dann können die erhobenen Daten aller Partner nahtlos miteinander genutzt werden.

*Aber..?*

**Janina Stompe (UAI):** Aber es war deutlich aufwändiger, an diesen Punkt zu kommen, als wir ursprünglich geplant hatten. Bei einem Forschungsprojekt dieser Größe muss man immer akzeptieren, dass man nicht alles bis ins Detail vorhersehen kann. Da kann zu viel zusammen kommen: Organisatorische Überraschungen, kaputte Sensoren, Lieferengpässe, regulatorische Herausforderungen, und natürlich immer der Punkt: Wenn man wüsste, was herauskommt, wäre es keine Forschung. Da ist es unverzichtbar, dass alle Partner an einem Strang ziehen, schnell und flexibel reagieren können und neue Lösungen finden. Das haben wir im Konsortium unter Beweis gestellt, und deswegen sind wir weiterhin optimistisch, dass wir die Ziele vollständig erreichen, die wir uns gesteckt haben. Die Stimmung ist gut, es herrscht überall eine sehr engagierte Zusammenarbeit – obwohl wir uns wegen der räumlichen Verteilung nur zweimal pro Jahr in Präsenz treffen.

**Jens Ziehn (Fh-IOSB):** Und auch wegen Corona, übrigens. Wir haben die ersten Planungen zum Projekt schon 2020 kurz nach Ausbruch der Pandemie gestartet. Und obwohl wir in der Antragsphase und der Frühphase des Projekts sehr intensiv zu-

sammengearbeitet haben, haben viele von uns sich das erste Mal im Frühling 2022 persönlich in Karlsruhe getroffen. Da hat sich in der Pandemie viel getan in der Technik zur Zusammenarbeit, aber auch in der Wahrnehmung. Gut möglich, dass ohne die Pandemie die geografische Verteilung der Partner eine Herausforderung gewesen wäre. Aber so treffen wir uns etwa zweimal im Jahr in Präsenz, und durch Videokonferenzen und Online-Tools sind wir trotzdem dauerhaft im engen Austausch.

*Was treibt die Partner denn an? Wie passt das AVEAS-Projekt in eure Strategie?*

**Philipp Renner (UAI):** UAI hat sich zum Ziel gesetzt, Daten, die für Entwicklung und Validierung autonomer Fahrzeuge und Fahrfunktionen notwendig sind, mit der bestmöglichen Qualität so effizient wie möglich zu verarbeiten und auszuliefern. Dazu annotieren wir Daten aus unterschiedlichen Sensoren, wie LiDAR, Kamera oder Radar, gemäß Funktion und Use-Case unserer Kunden. Dabei setzen wir auf Automatisierung durch KI, die beispielsweise Objekte ohne menschliche Hilfe erkennt und klassifiziert. Diese Automatisierung ist essenziell, um die riesigen Datenmengen überhaupt verarbeiten zu können.

**Janina Stompe (UAI):** Und im Projekt AVEAS liegt zunächst mal die Gesamtprojektleitung bei UAI. Wir sind damit an erster Stelle für den Projekterfolg verantwortlich. Das ist eine große Verantwortung für uns. Inhaltlich beteiligen wir uns natürlich auch: Wir prozessieren und annotieren die Daten, die von anderen Partnern aufgenommen werden. Dabei bringen wir auch unsere Kernkompetenz ein, nämlich das automatisierte Labeln. Dadurch können ganz andere Datenumfänge annotiert werden und in einer sehr hohen Geschwindigkeit. Darüber hinaus unterstützen wir auch bei der Auswahl der Erhebungsorte und Erhebungszeiten und bringen unsere Erfahrungen im Bereich Validierung von autonomen Fahrzeugen ein.

**Mohanad El-Haji (EDI):** Wir unterstützen Fahrzeugentwickler mit der Entwicklung von KI-basierten Applikationen sowie der Verschneidung von Daten aus verschiedenen Quellen mittels Ansätzen aus dem Bereich des Semantic Webs. Insbesondere unsere langjährige Kooperation mit Prof. Hideo Inoue vom Kanagawa Institute of Technology ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen: Gemeinsam haben wir ein Modell zur kontextsensitiven Risikobewertung basierend auf Trainingsdaten der Near-Miss Incident Data Base entwickelt. In AVEAS werden wir die Erkenntnisse auf neu gesammelten Daten anwen-



**Abb. 4:** Das AVEAS-Team und Stakeholder beim Workshop am 21. April 2023 beim Gastgeber und Partner Porsche Engineering in Mönshheim. Die Interviewpartner (v.l.n.r., markiert) sind Dr. Henrik Gommel von GO-TECH, Dr. Mohanad El-Haji von EDI, Dr. Martin Lauer vom KIT-Institut für Mess- und Regelungstechnik (MRT), Daniel Stadler und Jens Ziehn vom Fraunhofer IOSB, sowie Florian Lüttner vom Fraunhofer EMI. Abwesend beim Workshop, aber beim Interview dabei, sind die Partner Philipp Renner von der understand.ai GmbH und Dr. Matthias Pfriem von PTV (oben rechts).

den und insbesondere das Modell nach den Anforderungen unserer Projektpartner weiterentwickeln.

**Matthias Pfriem** (PTV): Die Entwicklung und Absicherung automatisierter Fahrfunktionen ist ein zentraler Use-Case für unsere Automotive-Kunden. Der Weg von der schnellen Demonstration einer Funktionalität, zum Beispiel in einem Pilotprojekt, hin zur Absicherung für einen verlässlichen und sicheren Einsatz in der Großserie, ist die zentrale Herausforderung. Ohne intensive Erprobung in möglichst unterschiedlichen relevanten Verkehrsumgebungen ist dies nicht zu erreichen. Das alles in Realfahrt zu machen, verbietet sich jedoch, zum einen aus Sicherheitsüberlegungen für die frühen Entwicklungsphasen, und natürlich auch auf Grund der schiereren Menge an Testkilometern, die man für den statistischen Nachweis der Betriebssicherheit abspulen müsste. Der Ausweg ist hier der möglichst intensive Einsatz der Simulation zur Erprobung im Rechner. Die mikroskopische Simulation PTV Vissim liefert hierfür den realistischen, multimodalen Realverkehr als Testumgebung und kann als Co-Simulation mit einer detaillierten Simulation des abzuschließenden Fahrzeugs gekoppelt werden.

#### *Und was interessiert euch persönlich an dem Projekt?*

**Philipp Renner** (UAI): Persönlich interessiert mich, direkt Teil der zukünftigen Transportlösungen zu sein und wie diese sicherer gemacht werden können. Prominente Beispiele bekannter Unternehmen außerhalb Deutschlands zeigen, dass darauf oft zu wenig Fokus gelegt wird und die »Time to Market« im Vordergrund steht, auch wenn das mitunter nicht zu Ende entwickelte Fahrzeuge zur Folge hat – die dann ein reales Risiko im Straßenverkehr darstellen können. Abgesehen davon finde ich die Diskussionen um Problemlösungen spannend, da das Thema autonomes Fahren noch wenige »abschließende«



*Wir alle stehen als Bürgerinnen und Bürger dem Ganzen immer etwas skeptisch und ängstlich gegenüber, und das, obwohl wir sogar ziemlich oft die Verantwortung über das Fahren abgeben. Wir fahren ja ganz selbstverständlich mit dem Taxi oder dem Bus. Ich finde, das ist ein wichtiger Punkt. Wir haben zwar mehr Vertrauen in Menschen, aber Menschen machen Fehler.«*

Dr. Janina Stompe, understand.ai

Standards etabliert hat, und hier direkt mitgewirkt werden kann.

**Janina Stompe** (UAI): Generell finde ich die Absicherung von autonomen Fahrfunktionen ein spannendes Thema. Wir alle stehen als Bürgerinnen und Bürger dem Ganzen immer etwas skeptisch und ängstlich gegenüber, und das, obwohl wir sogar ziemlich oft die Verantwortung über das Fahren abgeben. Wir fahren ja ganz selbstverständlich mit dem Taxi oder dem Bus. Ich finde, das ist ein wichtiger Punkt. Wir haben zwar mehr Vertrauen in Menschen, aber Menschen machen Fehler.

Menschen haben ein bestimmtes Verhalten, Menschen werden abgelenkt, sind unaufmerksam, gelangweilt, überfordert. Sie können in bestimmten kritischen Situationen vielleicht nicht schnell genug und nicht richtig reagieren. Das alles kann abgefangen werden, wenn nicht der Mensch, sondern eine künstliche Intelligenz das Fahrzeug fährt, oder zumindest den Fahrer wesentlich unterstützt. Aber neben der Entwicklung muss das eben auch erprobt



Beim Autonomen Fahren können bestehende und neuartige Anzeige- und Bedienelemente auf ganz andere Art genutzt werden. Wir sind gespannt, wie in den Probandenstudien in AVEAS damit umgegangen wird.«

Dr. Henrik Gommel, GOTECH

werden, idealerweise mit realbasierten Modellen und Simulationen. Und genau hier setzt ja AVEAS an.

**Maria Pohle (Fh-IVI):** Autonome Fahrfunktionen werden uns ja bereits heute als zukunftsweisende und verlässliche Technologien in der Werbung präsentiert. Vielen ist jedoch nicht bewusst, welcher erhebliche technische und wissenschaftliche Aufwand und Zeit im Hintergrund investiert wird, bis ein System Marktreife erlangt. Unfall- und Verkehrsszenarien können dazu beitragen schneller und effektiver verlässliche Prototypen zu entwickeln. Hierzu fehlt es derzeit noch an der notwendigen Bandbreite an Szenarien, um Prototypen anhand einer Vielzahl an repräsentativen Szenarien digital zu testen. Und genau da möchten wir gerne ansetzen.

**Henrik Gommel (GOTECH):** Betrachtet man die Entwicklung des Fahrzeuginterieurs in den letzten Jahren, so haben sich Anzeige- und Bedienelemente grundsätzlich geändert – beispielsweise durch den Einsatz von Multitouchdisplays. Damit hat sich nicht nur die optische und haptische Aufmachung der Fahrzeug-Cockpits verändert, sondern auch die Inhalte und Interaktionsmöglichkeiten, die uns diese Infotainmentsysteme bieten. Wenn nun die Aufgabe des aktiven Fahrens immer mehr an das automatisierte Fahrzeug abgegeben werden kann, erwarten uns noch viele weitere Möglichkeiten in der Auslegung dieser Systeme und bei der Integration in die Fahrzeuge. Beim Autonomen Fahren können bestehende und neuartige Anzeige- und Bedienelemente auf ganz andere Art genutzt werden. Wir sind gespannt, wie in den Probandenstudien in AVEAS damit umgegangen wird.

Diese theoretischen Möglichkeiten bereits in frühen Entwicklungsphasen und vor allem im Zusammenhang mit realitätsnahen und mitunter kritischen Verkehrssituationen zu erproben, Verhaltensweisen von Insassen zu erkennen und diese in die Interieurentwicklung einfließen zu lassen, ist äußerst

spannend: letztlich geht es um die Gestaltung des »Wohn- und Arbeitszimmers« künftiger Fahrzeuge!

**Martin Lauer (KIT-MRT):** Wir adressieren mit dem Projekt in meinen Augen zwei der wesentlichen Herausforderungen in Bezug auf Sicherheit automatisierter Fahrzeuge: Zum einen sind das die schwierigen Situationen, die wir selten beobachten können, die ein autonomes Fahrzeug aber dennoch sicher beherrschen muss. 99 % der Situationen im Verkehr mögen einfach sein und problemlos beherrschbar, die 1 % der verbleibenden Situationen sind die große Herausforderung. Die zweite Herausforderung besteht darin, Vertrauen in die Fähigkeiten der Fahrzeuge bei den zukünftigen Nutzern, bei anderen Verkehrsteilnehmern, in der Bevölkerung und bei Entscheidungsträgern zu schaffen. Dies erfordert, dass das Fahrzeugverhalten nachvollziehbar und vorhersehbar ist, dass die Fahrzeugsicherheit erlebbar gemacht wird, und dass wir nachweisen können, dass die autonomen Fahrzeuge sicherer unterwegs sind als von Menschen gesteuerte Fahrzeuge.

### *Werden Simulationen über kurz oder lang Realerprobungen ersetzen?*

**Jens Ziehn (Fh-IOSB):** Das muss in meinen Augen das Ziel sein. Wenn das Problem ist, dass man zehn Millionen Testkilometer fahren muss für die Absicherung, und Simulation das Problem lösen soll, dann doch, weil man zum Beispiel 9 Millionen Kilometer in der Simulation fährt und nur noch 1 Million Kilometer in Realität – und nicht umgekehrt. Soll heißen: Wenn Simulation die Testumfänge eindämmen soll, dann nicht, indem sie hier und da ein bisschen aushilft, sondern indem sie perspektivisch den allergrößten Teil der Testkilometer abdeckt. Dann stellen sich ganz neue Fragen: Wenn ich fast alles in der Simulation teste, wieso mache ich dann überhaupt noch Realtests? Wie stelle ich sicher, dass beides zusammen wirklich »alles« ergibt? Diese Fragen werden uns noch länger beschäftigen.

**Mohanad El-Haji (EDI):** Ich habe auch den Eindruck, dass immer mehr in die Simulation »wandert«. Jedoch halte ich es nicht für zielgerichtet, die Realerprobung komplett zu ersetzen: Der Aufwand die Realität dermaßen genau in einer Simulation abzubilden wird insbesondere bei Neuentwicklungen den Aufwand übersteigen, den es benötigt einen realen Prototyp bereitzustellen.

**Matthias Pfriem (PTV):** Ich denke, das ist keine Frage, auf die man mit »ja« oder »nein« antworten kann, sondern es geht hier um ein »wie viel«. Spätestens seit der in vielen Medien zitierten Abschätzung





**Abb. 5:** Die Simulation kritischer Situation erlaubt die gezielte Variation von Parametern, um Schwächen im System eines automatisierten Fahrzeugs zu identifizieren – im menschlichen Fahrverhalten ebenso wie etwa in der KI-basierten Sensorauswertung unter verschiedenen Lichtsituationen, wie hier in der Simulation OCTANE, deren Entwicklung im Rahmen von KAMO vorangetrieben wurde. Zudem erlaubt Simulation den direkten Abgleich zur vollständig bekannten Realität, wie oben links dargestellt.

der RAND Corporation aus dem Jahre 2016, dass es hunderte Millionen bis hunderte Milliarden Erprobungsmeilen zur Absicherung autonomer Fahrzeuge bräuchte, ist allen klar, dass ein rein auf Realerprobung gestützter Ansatz nicht zielführend sein kann. Mit der Simulation erschaffen wir uns daher möglichst gute Repräsentationen der echten Welt, um diese für virtuelle Tests einsetzen zu können. In der digitalen Welt kann ich hier natürlich ganz anders skalieren und daher Testumfänge abbilden, die in der Realität nicht leistbar wären. Und ich kann viel fokussierter absichern, da ich auf Situationen und Szenarien fokussieren kann, die besonders sicherheitsrelevant sind oder das automatisierte Fahrzeug vor ganz besondere Herausforderungen stellen. Allen Simulationen ist jedoch gemein, dass sie immer eine gewisse Abstraktion oder Vereinfachung in der Abbildung der echten Welt vornehmen müssen, um handhabbar zu bleiben. Wir können uns also am Ende nie sicher sein, dass sie wirklich in jeder Situation ganz genau alles abdecken, was es in der Realität auch geben könnte. Gerade wenn menschliches Verhalten als Einflussfaktor hinzukommt, ist die mögliche Bandbreite nahezu unendlich. Ich erwarte daher, dass die Entwicklung auch auf lange Sicht einen Anteil Realerprobung umfassen wird, einfach, um wirklich sicher zu gehen. Diese kann jedoch zu einem Zeitpunkt der Entwicklung stattfinden, wo durch die Absicherung im Computer schon ein sehr hoher funktionaler Reifegrad erreicht wurde, was das Restrisiko für die Realerprobung minimiert wie auch den Aufwand.

**Florian Lüttner (Fh-EMI):** Dem würde ich zustimmen: Ein bekanntes Paradox ist, dass wenn wir die Realität immer genauer in Simulationen nachbilden können, die Simulation sich irgendwann nicht mehr von der Realität unterscheidet. Entsprechend ließen

sich zu untersuchende Sachverhalte in der Simulation auch nicht mehr abstrahieren, und das würde wiederum zu erheblichem Aufwand führen. Doch wann sind wir genau genug in der Simulation? Simulationen werden zukünftig einen entscheidenden Beitrag bei der Absicherung technischer Neuerungen bilden. Potenzielle Gefahrenfelder und Versagenszustände können simulativ identifiziert werden. Durch gezielte Realerprobungen an diesen identifizierten Stellen können diese dann verifiziert und behoben werden.

**Maria Pohle (Fh-IVI):** Realerprobungen bieten klar den Vorteil, Systeme in ihrem »natürlichen Umfeld« zu testen, sind jedoch sehr kostenintensiv in Vorbereitung und Durchführung. Mit vertretbarem Aufwand können Fahrzeuge daher zum Beispiel im Rahmen von EuroNCAP bisher nur in einigen wenigen ausgewählten und klar definierten Situationen in Realerprobungen getestet werden. Um Punktoptimierung der Fahrzeughersteller auf diese Situationen zu vermeiden, hat EuroNCAP bereits in ihrer Roadmap 2025 angekündigt, dass zunehmend insbesondere automatisierte Fahrfunktionen simulativ getestet werden sollen, für ein breiteres und robusteres Assessment. Aus meiner Sicht werden allein aus diesen Betrachtungen heraus zukünftig vermehrt Simulationen zur Prüfung der Funktionssicherheit von Systemen zu erwarten sein. Jedoch halte ich allein aus den geltenden gesetzlichen Bestimmungen heraus, aber vor allem wegen der noch existierenden Skepsis, Realerprobungen für ein sinnvolles Verfahren.

*Wie nah sind Simulationen heute schon daran, Safety-kritische Komponenten abzusichern?*





Mit Simulation erschaffen wir uns möglichst gute Repräsentationen der echten Welt, um diese für virtuelle Tests einsetzen zu können. In der digitalen Welt kann ich ganz anders skalieren und daher Testumfänge abbilden, die in der Realität nicht leistbar wären.«

Dr. Matthias Pfriem, PTV

**Matthias Pfriem** (PTV): Diese Frage lässt sich aus meiner Sicht nicht pauschal beantworten, sondern hängt an der Tiefe des Verständnisses der Komponente und der Komplexität der Absicherung. Nehmen wir beispielsweise eine Spiralfeder im Fahrwerk. Natürlich ist diese Komponente Safety-kritisch. Ein Bruch einer Feder während der Fahrt kann schwerste Unfälle verursachen. Es handelt sich jedoch auch um eine klar beschreibbare Geometrie mit klar definierten mechanischen Eigenschaften und bekannten Materialkennwerten im klar definierten Lastfall als Wechselspiel zwischen Ein- und Ausfedern. Hier ist eine Absicherung in der Simulation schon heute machbar. Erhöhe ich die Komplexität und gehe zur Komponente Rad mit den mechanischen Eigenschaften der Felge, der Feder- und Dämpfungswirkung des Reifens und den viskoelastischen Eigenschaften des Gummis, dann ist das schon eine ganz andere Herausforderung. Und natürlich verhält es sich bei automatisierten Fahrfunktionen ganz ähnlich. Ein Notbremsassistent, der rein auf Basis eines Radarsignals eine reine Längsführungsaufgabe initiieren soll, ist eine ganz andere Herausforderung in der Absicherung als ein Highway-Pilot, der auf Basis einer Fülle von Sensorinformationen die Entscheidungen für die gesamte Fahraufgabe durchführen soll.

**Florian Lüttner** (Fh-EMI): In der Entwicklung neuer Fahrzeugkomponenten bilden zum Beispiel sogenannte FEM-Simulationen<sup>3</sup> und Sampling-Verfahren bereits heute eine zentrale Rolle in der Absicherung solcher Komponenten. Allerdings fehlen bisher realistische Abbildungen des vorkommenden Straßenverkehrs auf statistische Art und Weise. Diese würde es ermöglichen, über lang angelegte Simulationen solche Komponenten teilweise virtuell und annähern real abzusichern.

<sup>3</sup> Finite-Elemente-Methode, ein Verfahren aus der physikalischen Simulation

## → Typen von Simulationen

Für die Simulation von Verkehr und insbesondere Straßenverkehr kommen sehr unterschiedliche Simulationen zum Einsatz, die aus unterschiedlichen Forschungsdisziplinen stammen. Wir stellen einige der gängigen Arten von Simulationen vor.

**Verkehrssimulationen** haben das Ziel, realistisches Verkehrsaufkommen zu simulieren. Man unterscheidet zwischen **makroskopischer** Verkehrssimulation, die auf der Ebene von Personengruppen Mobilitätsbedarfe und -entscheidungen simuliert, und **mikroskopischer** Verkehrssimulation, die einzelne Verkehrsteilnehmer simuliert – wie die verbreitete und auch im AVEAS-Projekt genutzte Simulation PTV Vissim, aber auch das Verkehrsnachfragemodell mobiTopp im Beitrag »Wie bringen uns Künstliche Intelligenz und Daten nahtlos und nachhaltig ans Ziel?« ab S. 24). Beide Arten der Verkehrssimulation wurden ursprünglich entwickelt, um Verkehrsbedarfe und Verkehrsbelastungen zu modellieren. Im Bereich der Erprobung von automatisierten Fahrfunktionen erhalten sie aber zusätzliche Bedeutung, weil sie zum Teil in der Lage sind, realistisch Verkehrsszenarien zu simulieren, und damit die Umgebung eines fahrerlosen Fahrzeugs.

Aus dem Bereich des Maschinenbaus hingegen gibt es **Dynamiksimulationen**, die das Zusammenwirken mechanischer Komponenten, sowie zusätzlich potentiell Aerodynamik oder Antriebe umfassen. In einigen Fällen werden hier detaillierte **Mehrkörpersimulationen** betrieben – zur Reduktion der Aufwände sind aber auch vereinfachende Näherungen gängig, bei denen die Dynamik eines Fahrzeugs auf relativ einfach (und damit schnell) lösbare Gleichungen zusammengeführt wird.

Im Bereich der **Sensorsimulation** werden Umgebungssensoren wie Kameras, Laserscanner und Radar simuliert. Hier kommen vermehrt auch 3D-Engines aus Computerspielen zum Einsatz. Kamera- und Laserscannersimulationen teilen sich den Bedarf, optische Phänomene zu simulieren, während Radarsimulationen teilweise eine enge Verwandtschaft zu Funksimulationen haben, so wie die am KIT entwickelte Software ihert3d. Gerade bei Sensorsimulationen gehört oft zu den Anforderungen, nicht nur realistische Sensorbilder zu liefern, sondern auch »Annotationen« im Sinne von Informationen über die Positionen und Typen der sichtbaren Objekte als »Grundwahrheit«.

Kein Modell sondern eher eine Anwendung bezeichnen **Fahrsimulatoren**, wie in AVEAS von GOTECH betrieben, in denen menschliche Probanden in simulierten Szenarien fahren bspw. durch virtuelle Realität oder Projektionswände. Mit ihnen können menschliche Verhaltensweisen ebenso untersucht werden wie neue Konzepte für Interieur oder Mensch-Maschine-Interaktion.

Meist liegen diese Simulationen in eigenständigen Softwareprodukten vor. Durch die zunehmende interdisziplinäre Breite in Entwicklungsfragen nimmt aber auch der Bedarf zu, nicht nur einzelne Facetten zu simulieren, sondern ihr Zusammenspiel. Werden mehrere Simulatoren miteinander gekoppelt, spricht man von *Co-Simulation*.

### *Anders gefragt: Was fehlt bis zur rein virtuellen Testfahrt?*

**Jens Ziehn** (Fh-IOSB): Insgesamt kann man vielleicht sagen, dass es für die Absicherung komplexer Systeme, also zum Beispiel eines automatisierten Autos in der Innenstadt, zu wenige Daten gibt, um fundiert zu beurteilen, ob eine Simulation die Realität hinreichend vollständig und statistisch korrekt abbildet. Solche Eigenschaften fordert zum Beispiel der europäische »AI Act« prinzipiell berechtigt ein, und ich würde behaupten, dass keine heutige Simulation das erfüllt. Aber es liegt eben nicht zunächst daran, dass Simulation das nicht kann, sondern: es gibt heute zu wenige Daten, wie das »Ziel« aussehen sollte. Wenn das Ziel klar ist, gibt es – denke ich – heute schon viele wohlverstandene Methoden, es zu erreichen.

**Matthias Pfriem** (PTV): Hier sehe ich primär zwei Herausforderungen. Zum einen ist dies – ganz allgemein gesprochen – die Berechnung der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen. Wenn man die Wahrnehmung der Sensoren wie Radar, LiDAR oder Kameras auch in komplexen Situationen mit Reflexionen und Mehrfachreflexionen und herausfordernden Umgebungsbedingungen wie beispielsweise starkem Regen berechnen möchte, dann erfordert das derart anspruchsvolle Rechenverfahren, dass sich auch der virtuelle Test nicht mehr in gewünschtem Maße skalieren ließe. Hier kann es der geschicktere Ansatz sein, solche Komponentenabsicherungen in der realen Welt vorzunehmen, um dann in der Simulation mit vereinfachten Modellen zu arbeiten. Die zweite Herausforderung liegt im Faktor Mensch. Wären schlagartig alle Verkehrsteilnehmer mit deterministischen Verhaltensmodellen automatisiert, dann wäre es auch leichter, die daraus resultierenden Situationen verlässlich zu simulieren. Durch die Bandbreite des menschlichen Verhaltens kommt jedoch eine Variabilität in den Verkehr, die ich selbst durch intensive Randomisierungen oder breite Parametervariationen nicht vollumfänglich in der virtuellen Testfahrt wiedergeben kann. Daher bleibt auch hier die Ergänzung mit Realdaten das Mittel der Wahl.

**Henrik Gommel** (GOTECH): ... wobei diese Realdaten im Fall von menschlichem Verhalten nicht zwingend nur aus dem öffentlichen Verkehr stammen müssen. Seit wir mit der Entwicklung der VR-basierten Fahrsimulationsumgebung begonnen haben, hat sich alleine in der VR-Technologie und der damit ermöglichten Integration in das Simulationsumfeld unglaublich viel getan. Wir haben die Immersion, also das Zusammenspiel zwischen realer und virtueller Welt, signifikant erhöht und sind aus unserer Sicht in

AVEAS noch einmal entscheidend weitergekommen. Das merken wir etwa daran, dass die Quote in Bezug auf Motion-Sickness bei Probanden stark abgenommen hat. Die Bewegungskrankheit, die man beispielsweise auch beim Lesen als Beifahrer im Auto bekommt, ist ein großes Thema bei solchen Virtual-Reality-Anwendungen. Aber auch die Einbindung realer Verkehrssituationen, mit der wir uns aktuell im Projekt intensiv beschäftigen, stimmt uns für unsere Anwendungsfälle der Simulationsumgebung sehr positiv: Wir kommen einer rein virtuellen Testfahrt immer näher.

### *Welche Rolle spielt der »Faktor Mensch«, wie Matthias sagte, mit Blick auf die zunehmende Automatisierung?*

**Mohanad El-Haji** (EDI): Automatisierung hat keinen Selbstzweck, der Mensch ist die Instanz, die das Bewertungsschema aufstellt. Das bedeutet jegliche Automatisierung muss am Ende dienlich für Menschen sein, die Erwartungen erfüllen sowie den Befürchtungen Rechnung tragen.

**Henrik Gommel** (GOTECH): Für den Individualverkehr werden immer die menschlichen Bedürfnisse unterschiedlicher Art im Vordergrund der Fahrzeugentwicklung stehen. Ob das Fahrzeug selbst gefahren wird oder automatisiert fährt, verändert diese Bedürfnisse gegebenenfalls, jedenfalls müssen sich die Insassen beim »Gefahrenwerden« wohl und sicher fühlen. Und wir möchten im Projekt herausfinden, an welchen Kriterien das unter anderem festzumachen ist, insbesondere wenn es um kritische Verkehrssituationen geht.

**Mohanad El-Haji** (EDI): Ja, gerade in Absicherungskatalogen bilden wir den Faktor Mensch schon jetzt bei unseren Produktentwicklungen ab. Dies wird auch in Zukunft so sein, aber die Anforderungen wachsen mit der Systemkomplexität.

### *Wie, und wie bald, könnten diese Herausforderungen gelöst werden?*

**Matthias Pfriem** (PTV): Ein zentraler Ansatz ist Standardisierung. Es braucht beispielsweise Daten- und Kommunikationsstandards, um das herstellerübergreifende Zusammenspiel zwischen Fahrzeugen und auch mit der Infrastruktur zu ermöglichen. Es braucht eine Standardisierung von Testfällen und Absicherungsansätzen, um der Kommunikation Herr zu werden. Es braucht mehr Standardisierung von Komponenten, Plattformen, Softwarestacks etc. um nicht für jedes Fahrzeug alles entwickeln zu müssen, sondern die Aufwände verteilen zu können. Hierfür



**Abb. 6:** 95% der Verkehrsunfälle beruhen auf menschlichen Fehlern. Nur eine realistische Abbildung dieser menschlichen Verhaltensweisen in Simulationen erlaubt es, automatisierte Fahrfunktionen fundiert simulativ zu erproben – wie hier in der Verkehrssimulation PTV Vissim, die die Basis für das AVEAS-Projekt ist und auf die Entwicklungen von Rainer Wiedemann 1974 am KIT (damals: Universität Karlsruhe) zurückgehen.

kommt auch der Zusammenarbeit über die Grenzen von einzelnen Firmen hinweg eine große Bedeutung zu. Und natürlich braucht es die Organisation und Orchestrierung, sowohl für die beteiligten Menschen als auch die Modelle, Daten, und Komponenten um alles sinnvoll gemeinsam miteinander zum Funktionieren zu bringen. Schon heute stehen für alle genannten Bereiche Lösungsansätze zur Verfügung und sind in Verwendung. Ich erwarte keine Revolution, sondern Evolution. Also werden wir sprichwörtlich morgen bessere Lösungen haben und übermorgen noch bessere.

### *Was kann das AVEAS-Projekt aus eurer Sicht hier beitragen?*

**Janina Stompe (UAI):** Wir hoffen, dass wir mit dem Projekt dazu beitragen, aufzuzeigen, wie die Erhebung und Nutzung solcher Daten systematisiert werden kann. Wir werden im Rahmen der dreijährigen Laufzeit sicherlich nicht die gesamten Bedarfe der Branche, zumal dauerhaft, decken können. Aber die gewonnenen Daten, und insbesondere die entwickelten Lösungen, wie diese künftig erhoben und verarbeitet werden können, sollen dazu beitragen, langfristig die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge auf eine solide Datengrundlage zu stellen.

**Florian Lüttner (Fh-EMI):** Diese Datenbank soll in Zukunft eine der Standardquellen für Absicherungsszenarien bezüglich der Absicherung autonomen Verkehrs sein. Gleichzeitig sind die entwickelten Me-

thoden ein Fundament, um zukünftig automatisierte Fahrfunktionen und autonome Fahrzeuge rentabel durch realistische Simulationen abzusichern. Deshalb ist das Projekt auch so spannend, und ich freue mich, bisher und aktuell daran beteiligt zu sein und zukünftig weiter die Idee und die Zukunft des autonomen Fahrens zu gestalten.

**Matthias Pfrieder (PTV):** AVEAS treibt den Dialog zwischen Forschung, Fahrzeugherstellern und Tool-Anbietern voran und hilft, gemeinsame Zielrichtungen beim Aufbau der Lösungen zu entwickeln. Darüber hinaus führt die empirische Arbeit zu einer Sammlung relevanter Erprobungsszenarien, die in der zukünftigen Entwicklung und Absicherung Verwendung finden kann. Der Aufbau der Szenariodatenbank und die damit verbundenen Diskussionen zur Integration der verschiedenen Datenquellen führen zur weiteren Harmonisierung und Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Beschreibungs- und Modellierungsstandards.

**Janina Stompe (UAI):** Wir glauben, dass das für die Mobilität in Deutschland und den Wirtschaftsstandort von großer Bedeutung sein wird. Deshalb freuen wir uns, hier mit dem starken Konsortium dieses wichtige Thema anzugehen.

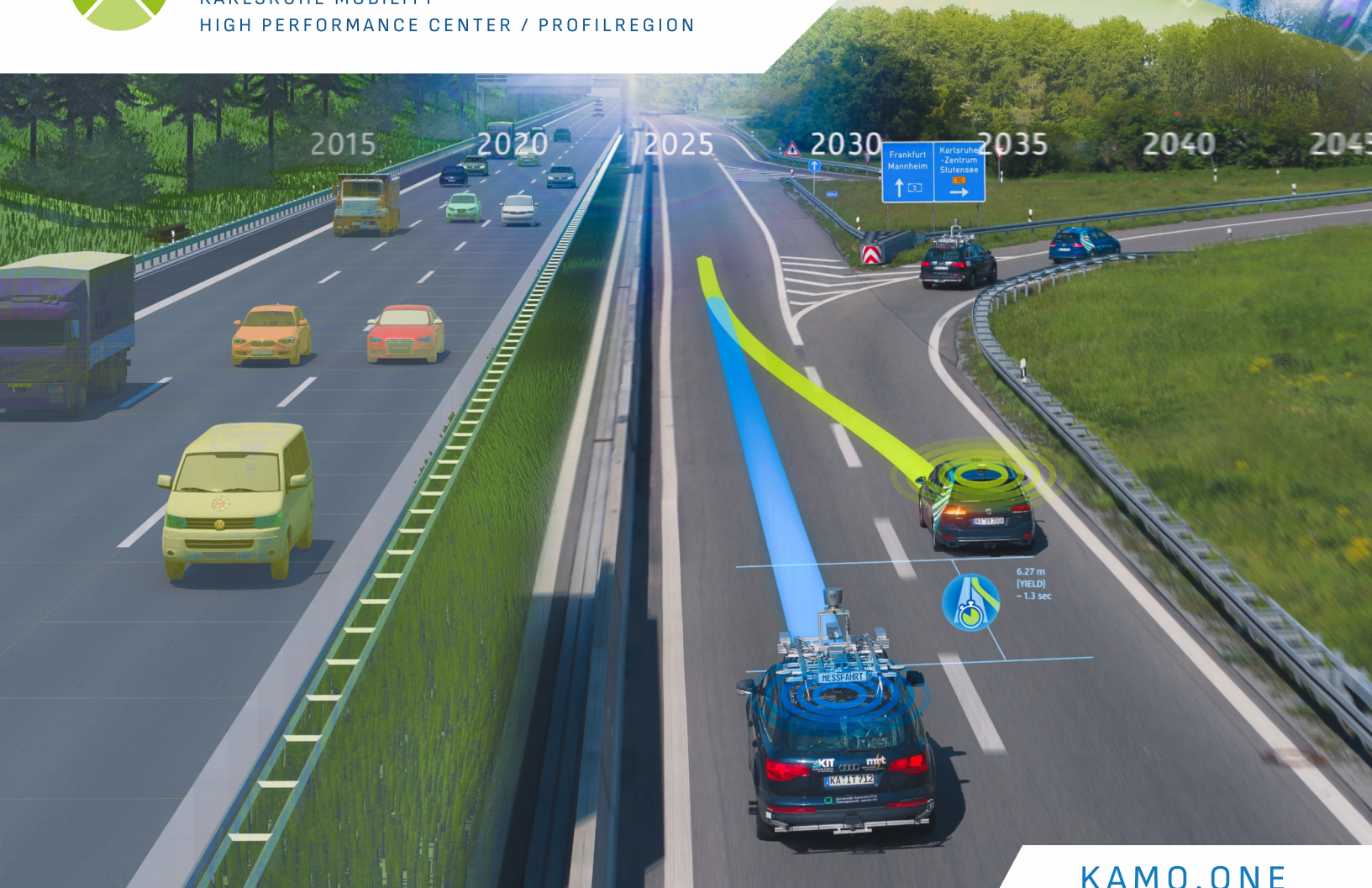
*Vielen Dank für das Gespräch!*





# 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



# Wie bringen uns Künstliche Intelligenz und Daten nahtlos und nachhaltig ans Ziel?



Damit Mobilität wirklich nachhaltig ist, müssen wir verschiedene Verkehrsmittel kombinieren, manchmal sogar auf derselben Strecke: Erst in die Straßenbahn, dann in den Bus, und für die letzte Strecke das Sharing-Fahrrad – das klingt schon kompliziert. Und was, wenn die Straßenbahn voll ist, der Bus im Stau steht, und am letzten Halt keine Sharing-Fahrräder mehr verfügbar sind oder es regnet? Wo der Mensch den Überblick verliert, soll Künstliche Intelligenz (KI) einspringen. Im Forschungsprojekt DAKIMO wird eine KI für Verkehrsmittel-übergreifende Routenvorschläge entwickelt, die zukünftig zum Beispiel in der regiomove-App des KVV zum Einsatz kommt.<sup>1</sup>

Nachhaltige Mobilität braucht »intermodale« Mobilität, also den flexiblen Wechsel zwischen unterschiedlichen Verkehrsträgern – einerseits je nach Reiseziel, aber andererseits mitunter auch für einzelne Teilstrecken. Das Prinzip ist dabei so alt, wie es unterschiedliche Verkehrsträger gibt: Mit dem Fahrrad zum Bahnhof, und schließlich mit dem Bus ans Ziel, das war schon die Mobilität unserer Großeltern oder Urgroßeltern.

Aber einerseits ist das Mobilitätsangebot, vor allem in Städten, seither erheblich gewachsen – beispielsweise um Bike- und Car-Sharing, E-Scooter und Mitfahrangebote – und andererseits hat diese intermodale Mobilität, im Gegensatz zur Frühzeit der Dampfloks und Fahrräder, inzwischen breite Konkurrenz durch ein Verkehrsmittel, das manchmal unverzichtbar, aber fast nie das nachhaltigste ist: das eigene Auto.

Diese Herausforderung aus Sicht der Nachhaltigkeit hat unterschiedliche Lösungen, die hier im Maga-

## → Partner Fraunhofer IOSB

Jens Ziehn und Reinhard Herzog arbeiten im DAKIMO-Projekt auf Seiten des Fraunhofer-Instituts für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB in der Karlsruher Oststadt. »Wir entwickeln schon seit vielen Jahren intelligente, vernetzte Systeme. Die Verantwortung für den Aufbau des KI-Fusionsservers in DAKIMO haben wir deshalb bewusst übernommen. Die Prognose des Mobilitätsverhaltens für eine ganze Stadt wie Karlsruhe ist aber auch für uns eine neue Dimension, und erfordert neue methodische Ansätze in KI und maschinellem Lernen«, so Reinhard Herzog, der die Gruppe Modellbildung und Vernetzung leitet.

Sein Kollege Jens Ziehn leitet am IOSB die Gruppe Automotive und Simulation, sowie das Gesamtprojekt DAKIMO. Er sagt: »Im Projekt sehen wir direkt, wie Mobilität sich mit Daten weiterentwickeln kann. Mit Simulationen tragen wir dazu bei, KI-Verfahren datenschutzsicher auf die Datenauswertung zu trainieren. Ziel ist es, Bürgerinnen und Bürger von KI profitieren zu lassen, ohne vermeidbare Risiken einzugehen.«

<sup>1</sup> Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms »Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit« gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.





**Abb. 1:** Das DAKIMO-Team beim Projektpartner und Gastgeber INIT in Karlsruhe (v.l.n.r.): Dominic Ziegler (INIT), Dr. Thomas Usländer (Fraunhofer IOSB), Dr. Uwe Zeltmann (IOSB), Dr. Arne Schumann (IOSB), PD Dr. Martin Kagerbauer (KIT), Dr. Reinhard Herzog (IOSB), Dominik Warzok (INIT), Stefan Scherr (PTKA), Jens Ziehn (IOSB), Dr. Tim Hilgert (INNOVAPLAN), Bernhard Schönauer (INIT), Michael Böttger (raumobil), Pia Tulodetzki (KIT), Gabriel Wilkes (KIT) und Tanja Klopfer (raumobil).

zin beleuchtet werden: nachhaltigere Antriebe, intelligente autonome Funktionen im Auto, aber auch bessere öffentliche Verkehrsverbindungen im ländlichen Raum (zum Beispiel auf Seiten 30, 44, 58). Aber um mehr Menschen von nachhaltigen, öffentlichen Verkehrsmitteln zu überzeugen, müssen diese vor allem in einer Hinsicht zum eigenen Auto aufschließen: Sie müssen sich zu einer ebenso unkomplizierten Universallösung entwickeln.

Dazu muss intermodale Mobilität einfacher, flexibler, zuverlässiger und planbarer werden. Die Komplexität der Angebote muss den Vorteil ausspielen, stets

das individuell bestmögliche Verkehrsmittel zu bieten, ohne den Nachteil, dem Menschen den Überblick zu erschweren.

## Das DAKIMO-Projekt

Deshalb ist 2021 in Karlsruhe das DAKIMO-Projekt (»Daten und KI als Befähiger für nachhaltige, intermodale Mobilität«)<sup>2</sup> unter Leitung des Fraunhofer IOSB gestartet – mit einer Förderung von rund 3,5 Mio. Euro des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Das Projekt bündelt die Kompetenzen der Karlsruher Unternehmen INIT, INNOVAPLAN, raumobil, des Karlsruher Verkehrsverbunds KVV, sowie der KAMO-Partner Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Institut für Verkehrswesen und Fraunhofer IOSB, wie in Abb. 1 repräsentiert.

Ziel des Forschungsprojekts ist es, am Beispiel der regiomove-App des KVV KI-unterstützte intermodale Routenvorschläge Realität werden zu lassen. Die Partner untersuchen dafür, wie das Potenzial bereits verfügbarer Daten etwa aus Apps, ÖPNV-Betrieb sowie Verkehrs- und Wettervorhersagen ausgeschöpft werden kann: Anwenderinnen und Anwender sollen passgenaue Vorschläge für Verkehrsmittel erhalten, die optimal zu ihren Bedürfnissen und ihrer Route passen. Dienstleistungen sollen verbessert, und Nutzungshürden nachhaltiger Verkehrsmittel abgebaut werden.

Dazu betrachtet das Projekt vier unterschiedliche Perspektiven (s. Abb. 3). Die jeweiligen Bereiche bringen einerseits spezifische Datenquellen ein, andererseits sind sie potenzielle Anwender der KI-basierenden Mobilitätsprognosen und -empfehlungen.

Das Projekt fußt auf der Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern, Betreibern und Zulieferern eben-

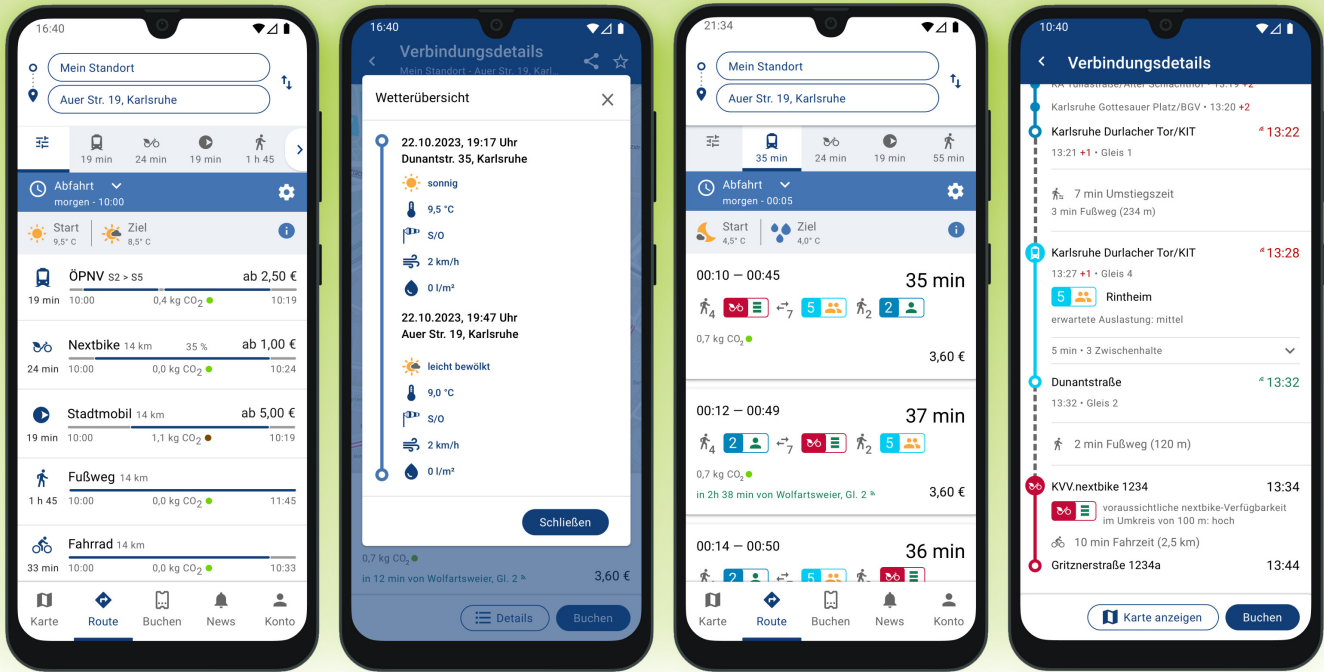
### → Partner INIT

Bernhard Schönauer, Dominic Ziegler und Dominic Warzok vertreten im Projekt das Unternehmen INIT GmbH.

INIT ist weltweit führender Anbieter von integrierten Planungs-, Dispositions-, Telematik- und Ticketinglösungen für Busse und Bahnen. Seit 40 Jahren unterstützt INIT Verkehrsunternehmen dabei, den öffentlichen Personennverkehr attraktiver, leistungsfähiger und effizienter zu gestalten.

Diese Erfahrung bringt INIT in das DAKIMO-Projekt ein, mit dem Ziel, in der Mobilitätskette den Wechsel von einem Verkehrsmittel zum nächsten zu erleichtern. Konkret liefert INIT Daten aus dem täglichen ÖPNV-Betrieb, die gemäß den erarbeiteten Anforderungen über maschinelle Lernverfahren aufbereitet werden und dadurch Prognosen, z.B. für Besetzungsgrade und Fahrtzeiten, verbessern, und den ÖPNV planbarer machen. Umgekehrt werden über DAKIMO weitere Datenquellen eingebunden, die neue Services ermöglichen und von denen z.B. der ÖPNV-Fahrgast durch Bereitstellung in den ÖPNV-Fahrzeugen über Anzeiger oder App profitiert. Als Beispiel seien hier Services genannt, die mobilitätseingeschränkte Personen oder Personen mit Gepäck oder Kinderwagen unterstützen, wenn z.B. defekte Infrastruktur ein Weiterkommen an Haltestellen verhindert.

<sup>2</sup> <https://dakimo.server.de>



**Abb. 2:** Mobilitätsangebote, Verkehrslage und Wetter sollen in der KVV.regiomove-App intuitiv dargestellt werden, wie hier in Entwürfen vom Partner raumobil. Dazu zählen Wetterlage, Live-Informationen und Prognosen zu Auslastung, Verfügbarkeit von Bike-Sharing und Verspätungen bzw. Anschlussverbindungen.

so wie der öffentlichen Hand, um die individuellen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Potenziale eines solchen »Daten-Ökosystems« bestmöglich zu nutzen. Auf diesem Wege soll das zugrundeliegende Forschungsziel erreicht werden, die Möglichkeiten von KI-basierter Datenauswertung im Mobilitätsanwendungsfall systematisch zu analysieren sowie Verfahren und Softwarearchitekturen methodisch zu entwickeln. Deren Eignung wird am realen

Anwendungsfall evaluiert, um die Zukunftstauglichkeit des Projektansatzes zu bewerten.

## Wie entstehen Mobilitätsbedarfe?

Um zu verstehen, wie KI zukünftig Menschen bei Mobilitätsbedarfen helfen kann, muss man zunächst verstehen, wie Mobilitätsbedarfe überhaupt entstehen (vgl. Abb. 5). Dabei wählen Menschen in der Regel

### → Partner KIT – Institut für Verkehrswesen

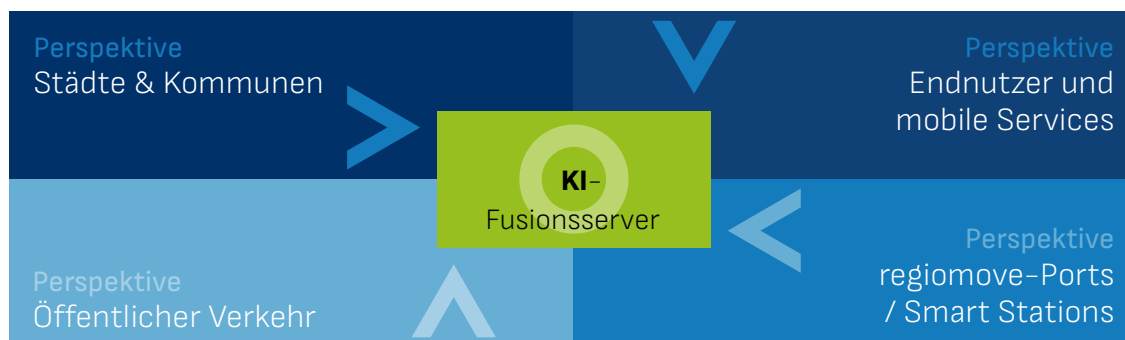
Martin Kagerbauer, Gabriel Wilkes und Pia Tulodetzki bearbeiten das Projekt am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Am KIT-Institut für Verkehrswesen forschen sie zu Mobilität in ihrer ganzen Breite und erstellen Modelle und Simulationen, die das Mobilitätsverhalten aller Personen einer Region enthalten.

»Die Beweggründe für Mobilität und die Wahl von Verkehrsmitteln sind komplex. Wir bringen in das Projekt unsere Expertise zu Mobilitätsverhalten und Modellierung ein. Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit ist sehr fruchtbar.«, sagt Martin Kagerbauer. Pia Tulodetzki ergänzt: »In DAKIMO analysieren wir unter anderem den Einfluss des Wetters auf das Mobilitätsverhalten mittels Befragungen und weiteren Datenquellen. Wir sehen hierbei faszinierende Zusammenhänge.« Gabriel Wilkes erläutert: »Mit unserem agentenbasierten Modellframework mobitopp können wir die Mobilität genau nachbilden. Durch die Berücksichtigung des Aspekts Wetter werden die Simulationen noch realistischer.«

### → Partner raumobil GmbH

Tanja Klopper und Michael Böttger vertreten das Unternehmen raumobil im DAKIMO-Projekt. »Bereits seit der Gründung unseres Unternehmens im Jahr 2006 treibt uns das Ziel an, Mobilität durch die Entwicklung smarter Technologien nachhaltiger zu machen. Daher entwickelt raumobil nun schon seit über 15 Jahren digitale Mobilitätsplattformen für bspw. Kommunen, Mobilitätsdienstleister und Eventbetreiber, die ihren Endnutzern eine unkomplizierte Anreiseplanung inklusive CO<sub>2</sub>-Berechnung ermöglicht«, beschreibt Michael Böttger, Geschäftsführer von raumobil, das Unternehmenskonzept.

»In DAKIMO haben wir uns das Ziel gesetzt, unsere Mobilitätsplattformen durch das Angebot neuer datengetriebener Services weiterzuentwickeln. Dazu gehört auch eine verbesserte und natürlich datenschutzkonforme Erhebung und Auswertung von Appnutzungsdaten und die Integration neuer, KI-gestützter Mobilitätsinformationen«, so Tanja Klopper, Produktmanagerin für das Thema Analyse und Projektmanagerin für DAKIMO.



**Abb. 3:** Die vier im Projekt betrachteten Perspektiven, deren Daten in den KI-Fusionsserver einfließen, und die von den Fusionsergebnissen profitieren sollen.

zunächst eine Aktivität (bspw. Sport), dazu ihr Ziel, dann das Verkehrsmittel, mit dem sie zu dem Ziel gelangen wollen, und als letztes die konkrete Route. Sind diese Entscheidungen planbar und modellierbar, können Vorschläge gemacht oder passende Mobilitätsangebote bereitgestellt werden.

Dabei hängen alle diese Entscheidungen von vielen Faktoren ab – neben stabilen Faktoren wie der Erreichbarkeit je nach Verkehrsmittel spielt auch das Wetter eine Rolle: Ziele werden wetterabhängig gewählt – beispielsweise die Entscheidung zwischen Kino oder Freibad. Anschließend wird das, oder werden die, Verkehrsmittel ausgewählt – bei schlechtem Wetter eher geschlossene Verkehrsmittel wie Auto oder ÖV, bei gutem Wetter beispielsweise eher das Fahrrad oder es wird zu Fuß gegangen. Schließlich wählt man die genaue Route, beispielsweise abhängig von der erwarteten Auslastung der Verkehrsmittel, Winterdienst oder schattigen Wegen.

### Was kann KI über Mobilität lernen?

Unsere alltäglichen Mobilitätsentscheidungen basieren wesentlich auf persönlichen Möglichkeiten und Erfahrungen – besonders mit Verkehrsmitteln oder Wegen. Nur sind diese Erfahrungen immer auch begrenzt. Vielleicht hat man sich vor langer Zeit einmal entschieden und kennt neuere oder andere Optionen einfach nicht. Hier kann KI, genauer gesagt maschinelles Lernen (ML), helfen: Was wir Menschen als Erfahrungen nutzen, sind für ML-Verfahren Daten – etwa aus Verkehrsflussmessungen, ÖPNV-Auslastungen, Verfügbarkeiten von Sharing-Angeboten, und vieles mehr. ML-Verfahren können aus diesen Daten Regelmäßigkeiten und Zusammenhänge lernen, die eine deutlich umfassendere und genauere Bewertung von Mobilitätsangeboten ermöglichen.

Und tatsächlich finden wir viele Zusammenhänge in unserem Mobilitätsverhalten. Wie in Abb. 5 ge-

#### → Partner INOVAPLAN GmbH

Tim Hilgert und Sascha Klein arbeiten im DAKIMO-Projekt auf Seiten der INOVAPLAN GmbH in der Karlsruher Oststadt. INOVAPLAN GmbH ist eine unabhängige Planungs- und Beratungsgesellschaft.

Seit dem Jahr 1985 berät INOVAPLAN Kunden aus Politik, Verwaltung und Wirtschaft bei allen verkehrlichen Fragestellungen. Die Firma bietet Lösungen in allen Bereichen des Verkehrswesens sowie in benachbarten Tätigkeitsfeldern wie Operations Research, Unternehmensberatung und Marktforschung.

»Ich wünsche mir, dass wir mit DAKIMO zu besseren Services für Nutzende beitragen können, zum Beispiel durch eine bessere Fahrtenplanung, als auch zu besseren Services für Kommunen und Mobilitätsanbieter, etwa durch verbesserte Verkehrsmodelle! Denn Mobilität beschäftigt uns alle und ist ein wichtiger Teil unseres Alltags«, so Tim Hilgert, der das Projekt bei der INOVAPLAN leitet.

zeigt variiert unser Mobilitätsverhalten wesentlich mit Wochentag und Ferien, der Temperatur, der Witterung oder – siehe Abb. 4 – Sonderereignissen.

### Wie können Menschen profitieren?

Damit die Prognosen und Empfehlungen der KI bei Bürgerinnen und Bürgern ankommen, setzt das Projekt auf der bestehenden Mobilitätsapp KVV.regiomove auf, die schon heute Routenvorschläge für unterschiedliche Verkehrsmittel und deren unkomplizierte Buchung, etwa von ÖPNV, Leihfahrrädern und E-Scootern, für Karlsruhe und Umgebung anbietet. Was die App im DAKIMO-Projekt lernen soll, ist jedoch, deutlich fundiertere intermodale Routenvorschläge zu machen, und Endnutzerinnen und -nutzern verständliche Werkzeuge an die Hand zu geben, um sich für das in der jeweiligen Situation bestmögliche Verkehrsmittel zu entscheiden, wie in Abb. 2 gezeigt.





**Abb. 4:** Auch Sonderereignisse folgen einer inneren Systematik: Pünktlich zum Beginn der Schlosslichtspiele am 18. August 2022 sammelt sich die höchste Konzentration an freien KVV.nextbike-Sharing-Fahrrädern am Karlsruher Schlossplatz. Kurz danach verteilen sich die Fahrräder wieder in alle Himmelsrichtungen.

#### → Projektträger Karlsruhe PTKA

Der Projektträger Karlsruhe PTKA, vertreten durch den Projektbevollmächtigten Stefan Scherr, betreut Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Auftrag verschiedener Fördergeber, insbesondere des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), und begleitet den Ergebnistransfer sowie übergeordnete Maßnahmen. PTKA ist eine unabhängige Organisationseinheit mit Sitz am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Im BMBF Forschungsprogramm »Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit«<sup>3</sup> werden Konzepte, Leistungen, Produkte und Verfahren zunächst prototypisch entwickelt, um danach erfolgreiche Lösungen allen Interessierten zur Verfügung zu stellen. Um aus Wissen Wert zu schöpfen, werden Mensch, Technik und Organisation integriert betrachtet. Die Fördermaßnahme »Auf dem Weg zur nachhaltigen Mobilität durch kreislauffähige Wertschöpfung (MobilKreis)« hat hierbei das Ziel, insbesondere Unternehmen der Automobil- und Mobilitätsbranche dabei zu unterstützen, innovative Systemlösungen zu entwickeln, zu gestalten und durch Prototypen umzusetzen und einzuführen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Verbundprojekt »Daten und KI als Befähiger für nachhaltige, intermodale Mobilität (DAKIMO)« werden darin mit Mitteln des BMBF gefördert und von PTKA betreut.

Ein wesentlicher Baustein ist dazu, die Kriterien einer optimalen Route anpassbar zu gestalten, und die Eigenschaften übersichtlich darzustellen. So wurde ein Darstellungskonzept erarbeitet, wie künftig Prognosen zu Wetter, Auslastung oder Verfügbarkeit von Sharing-Angeboten auf einen Blick bei der Routensuche angezeigt werden können.

### Wie können Kommunen und Unternehmen profitieren?

Chancen bietet DAKIMO auch in der Harmonisierung laufender Aktivitäten im Bereich Mobilitätsdatenräume, Vernetzung und Automatisierung, sowie in-

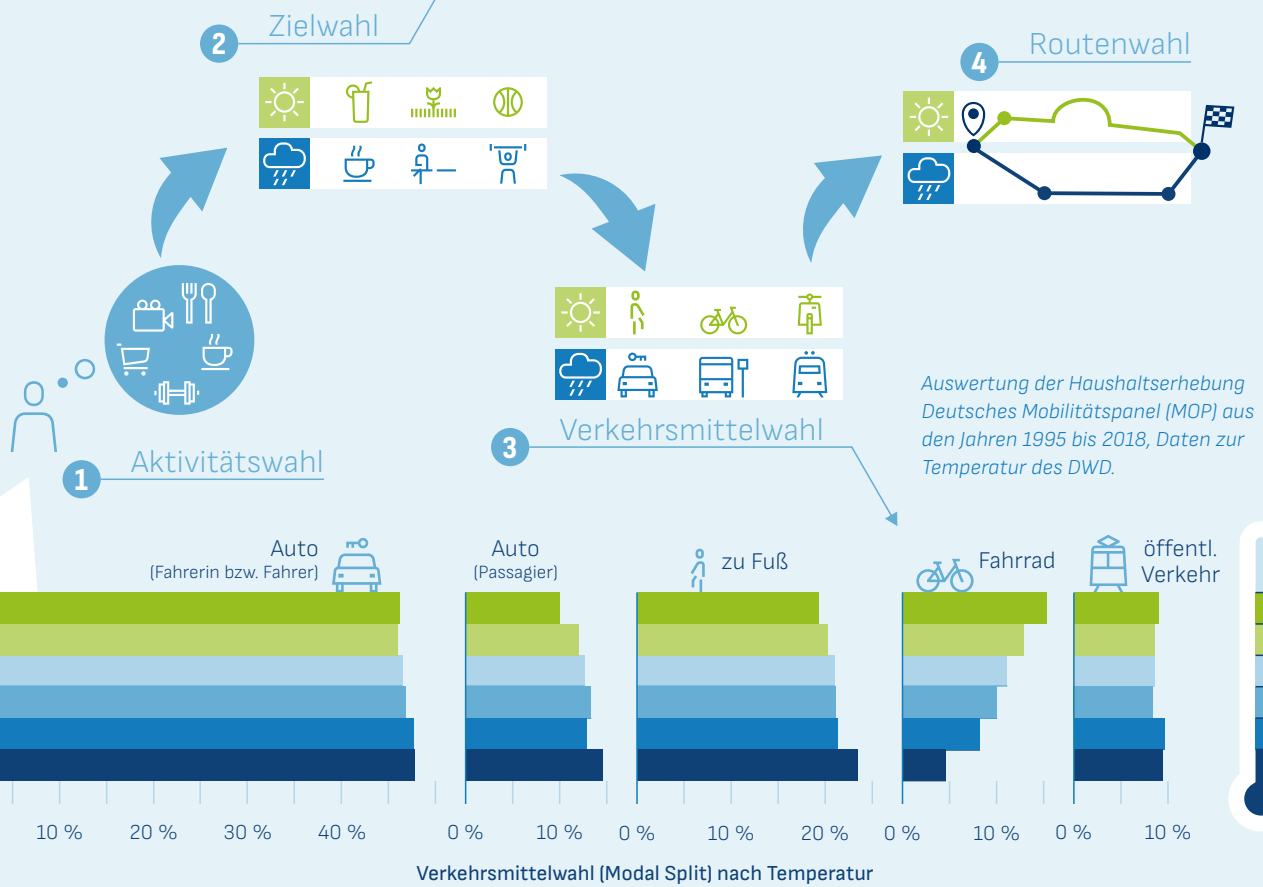
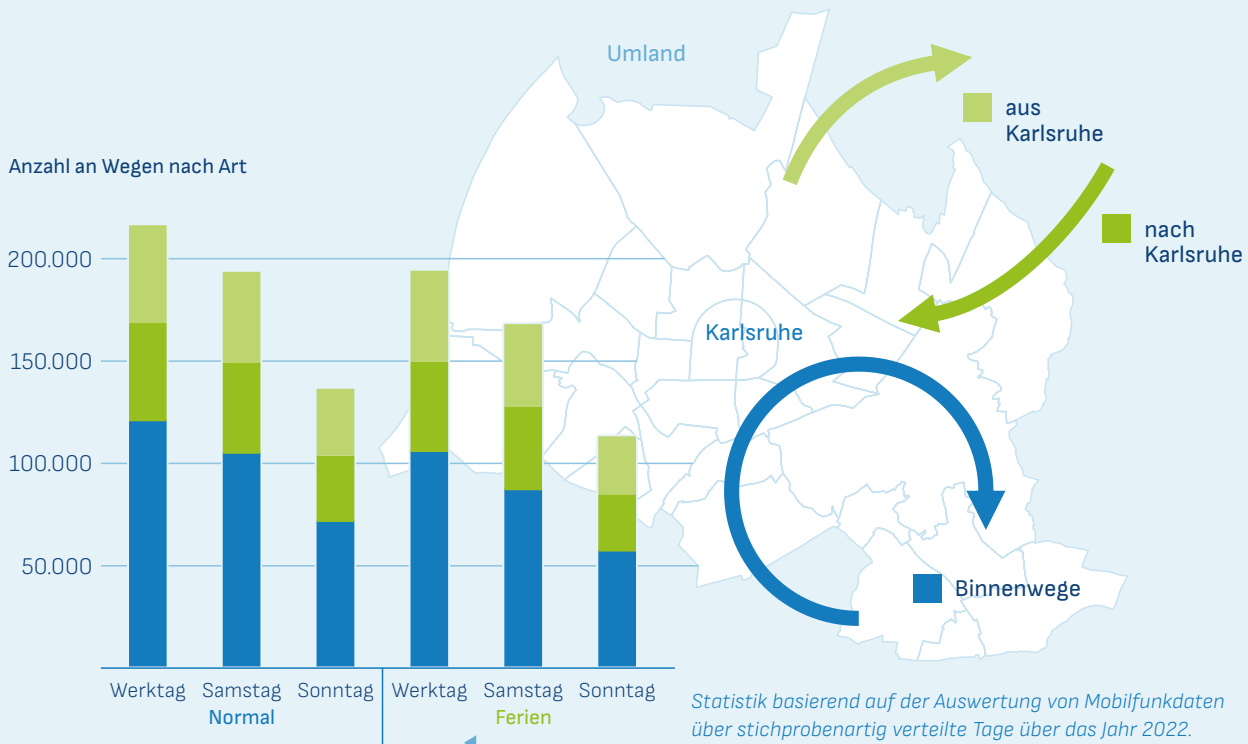
dividuellen Mobilitäts- und Informationsangeboten. Darüber soll ein KI-gestütztes Daten-Ökosystem ein neues Verständnis für Mobilität entwickeln, das die Mobilitätswende befördert und Herstellern, Betreibern und Dienstleistern die Möglichkeit bietet, Potenziale schneller und genauer zu verstehen und somit nachhaltig erfolgreiche Angebote zu gestalten. Kommunen und Verkehrsunternehmen können darauf aufbauend ihre Mobilitätsangebote besser und situationsgerechter bereitstellen. In die Ergebnisse der Datenanalysen und KI fließen dazu auch Verkehrsnachfragemodelle ein. Das agentenbasierte Verkehrsnachfragemodell mobiTopp kommt hierbei zum Einsatz. Mit dem Verkehrsnachfragemodell ist es möglich, verschiedene künftige Szenarien zu modellieren und deren Wirkungen zu quantifizieren.

### Ausblick

Das DAKIMO-Projekt läuft noch bis Ende 2024. Bereits im Herbst dieses Jahres soll eine erste prototypische Version des KI-Fusionsservers in Betrieb gehen, über den KI-basierte Routenvorschläge gemacht werden können. Nach Projektabschluss sollen die technischen Entwicklungen einerseits in die KVV.regiomove-App aufgenommen werden, sowie andererseits auch in der Disposition im ÖPNV-Betrieb und Kommunen in der Verkehrsplanung unterstützen. Die DAKIMO-Ergebnisse werden zudem einfließen in den Aufbau der Datenplattform der KI-Allianz Baden-Württemberg eG.<sup>4</sup> Dann sollen sich die entwickelten Ansätze im dauerhaften Praxiseinsatz beweisen, und es muss untersucht werden, wie gut die Methoden und Ergebnisse sich auf andere Regionen übertragen lassen. Schließlich wird nötig sein, das System fortlaufend um neue Daten- und Mobilitätsangebot zu erweitern. DAKIMO ist also nur ein Anfang – aber ein essentieller Schritt auf dem Weg hin zu einer flächendeckenden, nachhaltigen intermodalen Mobilität. ■

<sup>3</sup> <https://www.zukunft-der-wertschoepfung.de>

<sup>4</sup> <https://www.iosb.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2023/ki-allianz-bw-datenplattform-start.html>



**Abb. 5:** Wie entsteht Mobilitätsverhalten, und wie sieht das in Daten aus? Vier Schritte führen von einer menschlichen Idee bis zur konkreten Route – immer in Abhängigkeit von externen Faktoren wie beispielsweise Wetter oder Ferienzeiten.



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 Ziehn, J. R., Baumann, M. V., Beyerer, J., Buck, H. S., Deml, B., Ehrhardt, S., ... & Vortisch, P. (2023). Cooperative automated driving for bottleneck scenarios in mixed traffic. In 35th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2023), Anchorage, AK, USA, 4–7. Juni 2023., und kann unter der nebenstehenden Adresse abgerufen werden.



<https://ieeexplore.ieee.org/document/10186638> (kein Open-Access)

### [FORSCHUNG.KOMPAKT]

Marvin Baumann<sup>1A</sup>, Prof. Jürgen Beyerer<sup>1B,2</sup>, Sebastian Buck<sup>3</sup>, Prof. Barbara Deml<sup>1C</sup>, Sofie Ehrhardt<sup>1C</sup>, Christian Frese<sup>2</sup>, Dominik Kleiser<sup>2</sup>, Martin Lauer<sup>1D</sup>, Masoud Roschani<sup>2</sup>, Miriam Ruf<sup>4</sup>, Prof. Christoph Stiller<sup>1D</sup>, Prof. Peter Vortisch<sup>1A</sup>, Jens Ziehn<sup>2</sup>

# Sind höfliche autonome Autos auch gut für den Verkehrsfluss?



Wenn autonome Fahrzeuge über Funk Fahrmanöver aushandeln, soll das den Verkehr sicherer und effizienter machen. Ob der Verkehrsfluss insgesamt aber tatsächlich profitiert, oder sogar behindert wird, hängt stark von den Parametern der Umsetzung ab. Das zeigt der Einblick in ein Projektergebnis, in dem ein »vernetzter Engstellenassistent« entwickelt und simulativ erprobt wurde, in Kooperation von Fraunhofer und KIT.

## → Kontakt

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

<sup>A</sup> Institut f. Verkehrswesen (IfV)

<sup>B</sup> Lehrstuhl Interaktive Echtzeitsysteme (IES)

<sup>C</sup> Institut f. Arbeitswissenschaft u. Betriebsorganisation (ifab)

<sup>D</sup> Institut f. Mess- u. Regelungstechnik (MRT)

<sup>2</sup> Fraunhofer IOSB, [jens.ziehn@iosb.fraunhofer.de](mailto:jens.ziehn@iosb.fraunhofer.de)

<sup>3</sup> platomo GmbH

<sup>4</sup> Fraunhofer ICT

Die Situation wird vielen Autofahrern bekannt sein: Eine Fahrrichtung ist blockiert, etwa von parkenden Autos, Baustellen, Müllabfuhr oder Umzugs-Lkws. Die Autos in dieser Richtung müssen in den Gegenverkehr ausweichen. Wenn wenig Betrieb ist, kein Problem. Aber wenn dichter Verkehr herrscht, stauen sich die Schlangen – bis ein Fahrzeug auf dem freien Streifen die Vorfahrt gewährt und den Gegenverkehr abfließen lässt.

Wer diese Situation schon einmal erlebt hat, weiß: Diese höfliche Geste ist schon bei menschlichen Fahrern nicht selbstverständlich. Jeder ist in Eile, und manchmal hat man die Situation erst verstanden, wenn man an ihr vorbeigefahren ist. Und die Vorfahrt zu gewähren ist nicht ohne Risiko: Wer weiß, wie lange die entgegenkom-

mende Schlange abfließt, bis man selbst wieder fahren darf?

Können sich künftig vernetzte automatisierte Fahrzeuge so verständigen, dass ein fairer Verkehrsfluss

entsteht – und gleichzeitig für ihre Insassen einen so erkennbaren Mehrwert schaffen, dass diese die Funktion nicht sofort deaktivieren? Dieser Frage widmen sich die Autoren in diesem Beitrag, der im Rahmen des KAMO-Projekts »Einführungsszenarien für vernetztes, kooperatives Fahren« (iFORESEE) entstanden ist.

## Projektkontext: Das Henne-Ei-Problem im kooperativen Fahren

Im KAMO-Projekt iFORESEE, geleitet vom Fraunhofer IOSB und gefördert vom Land Baden-Württemberg (Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst und Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus) sowie der Fraunhofer-Gesellschaft, forschen die Partner Fraunhofer IOSB, ISI und ICT, sowie KIT, Hochschule Karlsruhe und FZI an frühen kooperativen Fahrfunktionen. Das Projekt befasst sich mit dem »Henne-Ei-Problem« im kooperativen und vernetzten Fahren: Autonome Fahrzeuge, die sich über Funk abstimmen, können viele Vorteile erzielen, in Bezug auf Sicherheit, Effizienz und Ökologie. Viele prominente Beispiele – zum Beispiel kooperative Unfallvermeidung durch Zusammenwirken mehrerer Fahrzeuge – funktionieren aber erst dann gut, wenn entsprechend viele kompatible Fahrzeuge im Verkehr sind.





**Abb. 1:** Drei vernetzte Autos stimmen sich per Funk ab, das Fahrzeug auf dem freien Streifen (oben) gewährt die Vorfahrt und lässt den entgegenkommenden Verkehr abfließen – auch die menschlich gesteuerten Fahrzeuge. Ob das nicht nur höflich, sondern auch günstig für alle Beteiligten ist, hängt sehr vom Algorithmus ab.



**Frühe vernetzte Fahrfunktionen müssen in einem Verkehr arbeiten können, in dem geeignete Partner noch die Ausnahme sind.«**

Bis das so weit ist, kann es dauern: Der Straßenverkehr besteht aus vielen älteren Bestandsfahrzeugen, und viele Technologien im Bereich vernetztes und automatisiertes Fahren sind auch heute keine Serienausstattung, sondern kostenpflichtige Extras. Entsprechend wird auch perspektivisch nur ein Bruchteil der Neufahrzeuge mit entsprechender Technologie ausgestattet. Warum sollte also überhaupt jemand heute schon solche Technologien für seinen Neuwagen buchen, wenn sie erst in 10 Jahren sinnvoll genutzt werden können? Bis dahin sind viele Fahrzeuge bereits erstmals weiterverkauft worden. Wie erzeugt man also die allererste Durchdringung mit komplexen vernetzten Fahrfunktionen, die dafür sorgt, dass die Technologie sich aus eigener Kraft verbreitet?

Das Projekt iFORESEE will einen Beitrag zur Lösung dieses Dilemmas leisten: Es wurde ein Katalog mit 13 vernetzten Fahrfunktionen erarbeitet, die die folgenden Zielsetzungen des Projekts erfüllen:

- Sie müssen in der Lage sein, schon bei niedrigen Automatisierungsgraden, mit wenig Zusatzausstattung im Fahrzeug, und ohne teuren Infrastrukturausbau zu funktionieren;
- sie müssen *unmittelbar* einen Mehrwert für den Nutzer darstellen – auch bei geringen Anteilen von »Partnerfahrzeugen« im Verkehr – sodass Kunden die Funktion kaufen und hinreichend oft nutzen würden (Fank, Knies, Diermeyer, Prasz, Reinhardt und Bengler, 2017);
- sie müssen zudem einen *dauerhaften* Mehrwert darstellen, also auch noch dann sinnvoll sein, wenn über die Jahre immer mehr vernetzte Fahrzeuge im Verkehr auftauchen;
- und sie müssen dazu beitragen, nutzbringende Technologien im Verkehr zu verbreiten, die durch zukünftige Generationen von vernetzten, automatisierten Fahrfunktionen genutzt werden können, und einen langfristigen Mehrwert im Verkehr darstellen.

Nur Funktionen, die diese Anforderungen erfüllen, haben nach Ansicht der Projektpartner eine Chance, echte »Brückentechnologien« zu sein, und heute schon das vernetzte Fahren von morgen zu un-

terstützen. Die Herausforderung des Ansatzes liegt dabei besonders darin, überhaupt zu beurteilen, ob eine gegebene Funktion diese Anforderungen erfüllt:

Einerseits muss untersucht und entwickelt werden, welche technischen Voraussetzungen die »frühen« und »langfristigen« Fahrfunktionen haben werden, und welche Technologien am Markt verfügbar sind. Das reicht von Kamera- und Laserscanner-Sensorik über Sensorauswertung und Dateninterpretation, bis zu Planungsalgorithmen und Funktechnik.

Andererseits lässt sich der »Wert« einer Fahrfunktion nicht rein technisch am Einzelfahrzeug bemessen. Nutzerakzeptanz hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem der Mensch-Maschine-Kommunikation (MMK); sie beeinflusst zusammen mit den Anschaffungs- und Betriebskosten wesentlich die Kauf- und Nutzungsbereitschaft. Diese wiederum beeinflusst Verkaufszahlen und Nutzerzahlen, und damit wirtschaftliche, ökologische, wie auch verkehrliche Wirkungen: Was für den einzelnen Nutzer gut ist, kann für den Gesamtverkehr oder die Umwelt sehr schlecht sein. Zudem beeinflussen regulatorische Fragen den Realeinsatz.

Wie viele Faktoren diesen »Wert« beeinflussen, und wie man sie in interdisziplinärer Kooperation ermitteln kann, zeigt beispielhaft die Untersuchung einer der 13 Fahrfunktionen: Der »vernetzte Engstellenassistent« soll die beschriebene Verkehrssituation auflösen, und dabei die genannten Kriterien erfüllen.

## Gegenstand der Arbeiten

Der »vernetzte Engstellenassistent« wurde im Projekt aus interdisziplinären Perspektiven betrachtet, um die Erfüllung der genannten Kriterien zu untersuchen. In der Publikation Ehrhardt, Baumann, Buck, Li, Deml und Vortisch, 2021 wurden Aspekte der MMK im Fahrzeug und der Akzeptanz untersucht. In Baumann, Buck, Ehrhardt, Roschani und Vortisch, 2021 wurden ausführlich die verkehrlichen Effekte des Systems analysiert. In Kowalewski, 2020 wurden Untersuchungen mit neu entwickelten Richtantennensystemen durchgeführt, anhand derer sich abschätzen lässt, welche Kommunikationsreichweiten im urbanen Raum für vernetztes Fahren zu erwarten sind. Zudem wurden Befragungen zu Akzeptanz, sowie Kauf- und Nutzungsbereitschaft einer entsprechenden Funktion durchgeführt.

In diesem Beitrag konzentrieren wir uns hingegen auf die Frage, wie eine optimale Verhandlungsstrategie zwischen den vernetzten, kooperativen Fahrzeugen aussehen sollte, die sicherstellt, dass die



### → Wie funktioniert Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation?

Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (in Deutschland oft Car2Car oder C2C genannt, im Englischen eher Vehicle-to-Vehicle bzw. V2V) bezeichnet im Allgemeinen den drahtlosen Austausch von Informationen zwischen Fahrzeugen im Betrieb. Dabei gibt es aber unterschiedliche Ansätze und Standards – eine universell akzeptierte Lösung hat sich noch nicht herauskristallisiert. Von speziellen Anwendungen abgesehen kommt hier in der Regel Funkkommunikation zum Einsatz, jedoch in unterschiedlichen Frequenzbändern und mit unterschiedlichen Methoden.

Zum Einen gibt es **Mobilfunk-Technologien** wie 4G, 5G oder LTE, die ebenso wie Handys ein Endgerät (das Fahrzeug) mit dem Mobilfunknetz verbinden, das den Nachrichtenaustausch übernimmt. Der Ansatz erlaubt praktisch eine weltweite Reichweite und gute Datenraten – aber nur, wenn die Mobilfunkabdeckung gut ist.

Ein gegensätzliches Konzept sind die sogenannten **Peer-to-Peer-Verbindungen**, bei denen zwei Geräte in Reichweite eine direkte Verbindung aufnehmen, ohne einen zentralen Vermittler (das Mobilfunknetz) zu nutzen. Gängige Protokolle wie DSRC/WAVE bzw. ETSI ITS-G5 (nicht mit »5G« zu verwechseln) sind eng verwandt mit dem WLAN bzw. Wi-Fi, das in Büros, Heimnetzen und Hotspots genutzt wird. Sie alle setzen auf dem Funkstandard IEEE 802.11 auf. Die Reichweiten sind hier, ähnlich wie im privaten WLAN, eher kurz: Einige 100 m bis 1000 m können erreicht werden. Dafür funktioniert die Technik auch in Bereichen wo gar kein Mobilfunkempfang ist, wie entlegenen Regionen oder Tunnel.

Und schließlich ist noch der zuvor genannte neue Mobilfunkstandard 5G noch einmal besonders zu erwähnen, da er zusätzlich auch Peer-to-Peer-Verbindungen unterstützt.

#### Mobilfunk-Technologien

Verbindung über Mobilfunkmasten in sogenannten Funkzellen und Weiterleitung über das Netzwerk. So können prinzipiell über beliebige Distanzen Daten ausgetauscht werden, sofern Verbindung zu einer Zelle besteht.



#### Peer-to-Peer-Verbindungen

Direktverbindung zwischen Fahrzeugen bzw. Verkehrsinfrastruktur (Ampeln, Baustellen), relativ kurze Reichweite aber unabhängig von sonstiger Infrastruktur, eng verwandt mit Büro- und Heim-WLAN.

Funktion für alle beteiligten Verkehrsteilnehmer akzeptabel ist, und insbesondere für die »gewährenden« Nutzer vermeidet, dass diese die Funktion einfach abschalten, um keine Nachteile in Kauf zu nehmen – sowie die damit verbundene Frage, welche technischen Voraussetzungen notwendig sind, um das System zu realisieren. Um diese »optimale Strategie« zu finden, messen wir die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss in umfangreichen Simulationsuntersuchungen und besprechen auffällige und interessante Effekte.

Dabei befassen wir uns spezifisch mit der Situation im *dichten* Verkehr, in dem sich Warteschlangen bilden und deren Abfluss geregelt werden soll, ohne eine zentralisierte Steuerung (zum Beispiel eine Ampel) zu erfordern. Mit dem Fall von *dünnem* Verkehr, in dem nur vereinzelt Fahrzeuge die Engstelle passieren, befasst sich hingegen die Publikation Naumann und Stiller, 2017.

## Problemdefinition und Anforderungen

Für eine zweistreifige Straße, wie in Abb. 2 dargestellt, unterscheiden wir zwischen Fahrzeugen auf

dem *blockierten Streifen*, die an der Engstelle in den Gegenverkehr wechseln müssen, und Fahrzeugen auf dem *freien Streifen*, die auf dem eigenen Streifen durch die Engstelle fahren können. Es sind keine Ampeln aufgebaut; es wird davon ausgegangen, dass gemäß Verkehrsregeln der *freie Streifen* im Allgemeinen Vorfahrt hat, jedoch dem blockierten Streifen die Vorfahrt einräumen kann.

Wir bezeichnen die Fahrzeuge auf dem *freien* sowie dem *blockierten* Streifen mit

$$F = (f_1, f_2, f_3, \dots) \text{ bzw. } B = (b_1, b_2, b_3, \dots). \quad (1)$$

Da das System als Zusatzausstattung eines automatisierten Fahrzeugs konzipiert ist, können wir davon ausgehen, dass die nutzenden Fahrzeuge ohnehin über einen Grundstock von Technologie verfügen, die einen automatisierten Betrieb in der Umgebung ermöglicht. Konkret setzen wir voraus, dass die Fahrzeuge über folgende Technologie verfügen, die durch das kooperative System mitgenutzt werden kann:

- Systeme für Umgebungswahrnehmung und automatisiertes Fahren, um die reguläre Fahraufgabe (ohne die neue vernetzte Funktion) bewältigen zu können.





**Abb. 2:** Beispielhafte Situation an der Engstelle, wobei Fahrzeuge mit der kooperativen Funktion blau gefüllt dargestellt sind, alle anderen (zum Beispiel menschlich gefahrene) Fahrzeuge als Umrisse. Die Fahrzeuge auf dem blockierten Streifen ( $b_1, \dots, b_7$ ) müssen darauf warten, dass eines der Fahrzeuge auf dem freien Streifen ( $f_1, \dots, f_8$ ) ihnen die Vorfahrt gewährt. Ziel war es, eine Methode zu finden, wie sich die kooperativen Fahrzeuge über Funk auf eine Strategie verständigen können. Die vorgeschlagene Lösung besteht darin, dass jedes kooperative Fahrzeug auf dem freien Streifen (genauer gesagt vermutlich: die Passagiere des jeweiligen Fahrzeugs) einen Wert  $d_{\max}$  auswählen, der angibt, wie viele blockierte Fahrzeuge sie maximal abfließen lassen würden.

tigen zu können. Dazu würde üblicherweise die Fähigkeit gehören, andere Verkehrsteilnehmer und befahrbare Straßenbereiche zu erkennen, sodass das Fahrzeug »autonom« durch die Engstelle fahren könnte, wenn der Verkehr das zulässt.

- Ein System zur globalen oder relativen Positionierung auf der Straße (bspw. GPS mit Kartendaten)
- Eine Technologie zur Kommunikation mit potentiellen Partnerfahrzeugen, entweder über Mobilfunk (4G, 5G) oder über lokale Direktverbindungen, wie die WLAN-verwandten Standards 802.11p, DSRC/WAVE bzw. ETSI ITS-G5.

Wir gehen außerdem davon aus, dass das System grob den Verlauf der Engstelle kennt, zum Beispiel dank anderer vernetzter Fahrzeuge, die sie bereits durchquert haben.

Aus verkehrlicher Sicht ist wünschenswert, dass sich ein »ausgeglichener Fluss« ergibt, also beide Richtungen gleichmäßig abfließen können.<sup>1</sup> Auf dieser Grundlage lassen sich die folgenden Anforderungen formulieren:

- Verkehrsfluss sollte ausgeglichener werden, je mehr kooperative Fahrzeuge im Verkehr existieren
- Negative *allgemeine* Effekte sollten vermieden werden: Das System sollte nicht »überkompensieren« und systematisch vernetzte Fahrzeuge, oder Fahrzeuge auf dem freien Streifen benachteiligen – sowohl bei geringen Durchsetzungsquoten an kooperativen Fahrzeugen, wie auch im weit in der Zukunft liegenden Fall, wo potentiell

alle Fahrzeuge ein entsprechendes System haben.

- Negative *individuelle* Effekte für einzelne Verkehrsteilnehmer sollen konkret benannt und möglichst begrenzt werden.
- Technische Mehraufwände für die Umsetzung sollen vermieden werden; insbesondere soll keine zentrale, Ampel-artige Steuerungsinstanz betrieben werden. Das System soll dezentral arbeiten können.
- Sicherheitskritische Funktionen des Fahrzeugs sollen nicht berührt werden.

## Der Kooperations-Algorithmus

Basierend auf diesen Überlegungen soll nun ein Algorithmus entwickelt werden, anhand dessen sich die vernetzten Fahrzeuge in der Nähe einer Engstelle abstimmen können, und entscheiden, welches Fahrzeug unter welchen Bedingungen Vorfahrt gewährt – und unter welchen nicht. Um unsere tatsächliche Lösung zu motivieren, lohnt es sich, einige Varianten zu diskutieren, die unsere Anforderungen *nicht* geeignet erfüllen.

### Die nicht-vernetzte Variante

Prinzipiell lässt sich »höfliches« autonomes Fahren auch ohne Funk realisieren. Beispielsweise könnte ein automatisiertes Fahrzeug auf dem freien Streifen einfach nach Zufallsprinzip ab und zu die Vorfahrt gewähren (zum Beispiel indem es anhält und Lichthupe gibt). Das wäre ausreichend um zu einem ausgeglicheneren Verkehrsfluss beizutragen: Je mehr solcher Fahrzeuge im Verkehr sind, umso regelmäßiger wechselt der Verkehrsfluss die Richtung, und umso »fairer« der Fluss. Das Problem: Gewährt ein autonomes Fahrzeug auf dem freien Streifen die Vorfahrt, könnten auf dem blockierten Strei-

<sup>1</sup> Das ist tatsächlich etwas vereinfacht, weil es sein kann, dass in eine Richtung eine wesentlich höhere Nachfrage herrscht, beispielsweise zum Feierabend in Richtung Stadtauswärts, und sich entsprechend mehr Fahrzeuge in dieser Richtung stauen – diese Unterscheidung ist aber hier nicht wesentlich.



Die Herausforderung besteht nicht darin, eine passende Gelegenheit zum Vorfahrt-Gewähren zu finden, sondern sicherzustellen, dass negative Effekte für alle beteiligten Verkehrsteilnehmer minimiert werden.«

fen beliebig viele Fahrzeuge abfließen. Die Passagiere des gewährenden Fahrzeugs müssten warten, bis auf dem blockierten Streifen wieder ein Fahrzeug die Vorfahrt zurückgibt. Diese Unwägbarkeit kann die Akzeptanz deutlich einschränken: Passagiere, die zum Beispiel pünktlich zu einer gegebenen Zeit am Ziel ankommen müssen, würden eine solche Funktion vermutlich ungern nutzen.

#### Die »ich-möchte-fahren«-Variante

Setzen wir nun voraus, dass Fahrzeuge über Funk kommunizieren können, ist das Naheliegendste, dass wartende Fahrzeuge auf dem blockierten Streifen eine Funknachricht absetzen, die besagt: »Ich möchte fahren.« Ein entsprechend ausgestattetes Fahrzeug auf dem freien Streifen könnte dann diesem Fahrzeug den Gefallen tun und die Vorfahrt gewähren. Aber diese Funknachricht ist im Grunde bedeutungslos: Alle Fahrzeuge auf dem freien Streifen können gesichert annehmen, dass alle Fahrzeuge auf dem blockierten Streifen (autonom, vernetzt oder einfach nur menschlich gesteuert) gerne abfließen wollen. Diese Variante bringt also praktisch keinen grundsätzlichen Vorteil gegenüber der nicht-vernetzten Variante: Das gewährende Fahrzeug müsste potentiell unkalkulierbar lange warten.

#### Die tatsächlich entwickelte Variante

Die tatsächlich entwickelte Variante ist in gewisser Weise das genaue Gegenteil der »ich-möchte-fahren«-Variante: Fahrzeuge auf dem blockierten Streifen kommunizieren nicht ihren Fahrtwunsch, sondern ihre Bereitschaft, vor der Engstelle zu halten und den Verkehrsfluss an den freien Streifen zurückzugeben. Warum sollten sie das tun, oder genauer: Kann es sein, dass alle Beteiligten davon profitieren?

Aus der Sicht von kooperativen Fahrzeugen auf dem freien Streifen ist der Vorteil klar: Wenn sie wissen, dass ein blockiertes Fahrzeug gesichert anhalten wird, können sie abschätzen, wie viel Zeit

sie schlimmstenfalls verlieren. Haben sie noch ausreichend viel Zeitpuffer übrig, können sie die Vorfahrt gewähren und den Gegenverkehr bis zu diesem Fahrzeug abfließen lassen – ansonsten tun sie das nicht. Konkret können die Passagiere in den Fahrzeugen auf dem freien Streifen einen Parameter  $d_{\max}$  einstellen, der beispielsweise angibt, wie viele Fahrzeuge sie maximal abfließen lassen würden, wie in Abb. 2 gezeigt. Findet sich ein vernetztes Fahrzeug auf dem blockierten Streifen, das maximal an Position  $d_{\max}+1$  in der Warteschlange steht, gewährt das freie Fahrzeug der Gegenrichtung die Vorfahrt.<sup>2</sup>

Aber auch das vernetzte Fahrzeug auf dem blockierten Streifen profitiert, obwohl es nur zusagt, nicht zu fahren. Zwar wird es in dieser Runde sicherlich nicht die Engstelle durchqueren können, aber es rückt immerhin in der Schlange vor, dank seines Versprechens, zu warten. Sobald das nächste kooperative Fahrzeug an die freie Spitze kommt, kann es womöglich abfließen.

Wir schreiben »womöglich«, weil wir den Einfluss der menschlichen Fahrer nicht vergessen dürfen. Sie können sowohl auf dem freien Streifen höflich sein und ihrerseits (und zusätzlich) den blockierten Streifen abfließen lassen; es kann aber auch passieren, dass ein menschliches Fahrzeug auf dem blockierten Streifen stoppt und somit die Vorfahrt zurückgibt, bevor das kooperative Fahrzeug an der Spitze ankommt, das versprochen hatte, zu warten. In dem Fall fließen weniger als  $d_{\max}$  Fahrzeuge vom blockierten Streifen ab; das dortige kooperative Fahrzeug rückt etwas vor, aber nicht bis an die Spitze. Diese Effekte werden wir berücksichtigen müssen. Gleichwohl gibt es kein (plausibles) Verhalten von menschlichen Fahrern, das den Sinn der Kooperation untergraben könnte.

Wir fassen den Abstimmungsprozess bis hierher kurz zusammen (Details sind der Original-Publikation zu entnehmen):

1. Ein kooperatives Fahrzeug auf dem freien Streifen  $f_1$  nähert sich der Engstelle, und erkundigt sich nach Kooperationspartnern auf dem blockierten Streifen und ihren Warteschlangenpositionen. Zuvor (vermutlich zu Fahrtbeginn) haben die Passagiere von  $f_1$  einen Parameter  $d_{\max}$  gewählt.

<sup>2</sup> Tatsächlich ist es nicht ganz trivial, die Position in der Schlange zu bestimmen. Es würde sich also um einen ungefähren Schätzwert handeln, und es könnte auch eher eine geschätzte Wartezeit als eine Anzahl an Fahrzeugen sein. Die Erklärung des Prinzips würde das alles aber wesentlich verkomplizieren, deshalb gehen wir hier davon aus, dass die »Anzahl an abfließenden Fahrzeugen« hier die relevante und bekannte Maßeinheit ist.

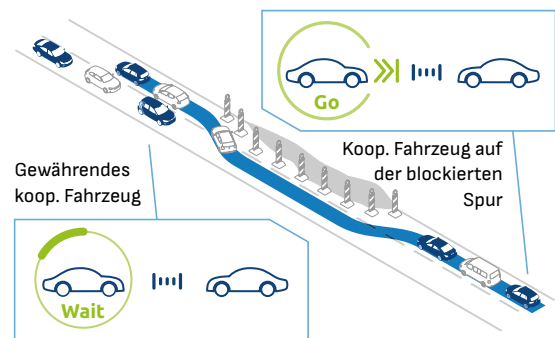
2. Alle kooperativen Fahrzeuge auf dem blockierten Streifen melden ihre Positionen zurück.
3. Das Fahrzeug  $f_1$  wählt dasjenige blockierte Fahrzeug aus, dessen Position *höchstens* seinem  $d_{\max} + 1$  entspricht, und bittet dieses Fahrzeug, zu warten. In Abb. 2 wäre das  $b_4$ .
4. Stimmt dieses Fahrzeug ( $b_4$ ) zu, gewährt  $f_1$  dem blockierten Streifen die Vorfahrt: Es hält an und gibt Lichthupe. Außerdem benachrichtigt  $f_1$  alle weiter vorne wartenden blockierten Fahrzeuge (in Abb. 2 konkret  $b_2$ ), dass sie ohne stoppen zu müssen abfließen dürfen.
5. Sobald entweder ein menschlicher Fahrer, oder das kooperative Partnerfahrzeug  $b_4$  auf dem blockierten Streifen stoppen, kann  $f_1$  in die Engstelle fahren.

Ist das System so schon fertig? Nicht ganz: Auf dem blockierten Streifen sind jetzt (bis zu)  $d_{\max}$  Fahrzeuge abgefließen. Wenn jetzt direkt wieder ein kooperatives Fahrzeug auf dem freien Streifen kommt (in Abb. 2 ist zum Beispiel das übernächste Fahrzeug  $f_3$  wieder vernetzt, direkt gefolgt von einem weiteren,  $f_4$ ), und alle diese Fahrzeuge wieder (bis zu)  $d_{\max}$  Fahrzeuge abfließen lassen, kann es passieren, dass der freie Streifen plötzlich erheblich benachteiligt ist: Die vernetzten Fahrzeuge wären »zu höflich«, der Verkehrsfluss wäre überkompensiert. Genau das (unter anderem) wollen wir laut unseren Anforderungen vermeiden. Es muss sichergestellt werden, dass anschließend in etwa gleich viele Fahrzeuge auch vom freien Streifen abfließen wie vorher vom blockierten. Die menschlichen Fahrer auf dem freien Streifen können wir ebenso wenig beeinflussen wie die auf dem blockierten Streifen, aber wir können mit den vernetzten Fahrzeugen dort kommunizieren.

6. Fahrzeug  $f_1$  kommuniziert den nachfolgenden vernetzten Fahrzeugen (in Abb. 2  $f_3$ ,  $f_4$  und  $f_8$ ), ...

- a. ... entweder, dass alle Fahrzeuge bis Position  $d_{\max}$  abfließen dürfen.
- b. ... oder, dass alle Fahrzeuge bis  $d_{\text{tatsächlich}}$  abfließen dürfen, wobei  $d_{\text{tatsächlich}}$  die tatsächliche Anzahl an abgefließenen Fahrzeugen ist (also weniger als  $d_{\max}$ , wenn ein menschliches Fahrzeug auf dem blockierten Streifen anhält).

Welche der beiden Varianten ist besser? Macht das überhaupt einen Unterschied? Die zweite Frage ist eindeutig zu bejahen: Wir werden im folgenden Abschnitt Evaluation sehen, dass die verkehrlichen Ef-



**Abb. 3:** Beispiel der entwickelten Mensch-Maschine-Kommunikation (MMK), basierend auf (Ehrhardt, Baumann, Buck, Li, Deml und Vortisch, 2021), wobei kooperative Fahrzeuge blau gefüllt dargestellt sind, alle anderen Fahrzeuge hingegen als Umrisse. Das vordere vernetzte Fahrzeug auf dem freien Streifen gewährt die Vorfahrt für den blockierte Streifen. Den Passagieren wird ein Countdown angezeigt, bis die Fahrt fortgesetzt wird. Das kommuniziert den Vorteil des Ansatzes, nämlich die klar abschätzbare maximale Wartedauer. Das kooperative Fahrzeug auf dem blockierten Streifen, das zugestimmt hat zu warten, zeigt seinen Passagieren den Fortschritt bis zur Spitze der Warteschlange an. Eine Untersuchung zur Wirkung einer möglichen MMK-Gestaltung findet sich in (Ehrhardt, Baumann, Buck, Li, Deml und Vortisch, 2021).

fekte sich erheblich unterscheiden. Vorteilhaft in diesem Sinne ist Variante 6b, die wir als »zählende Variante« bezeichnen werden. Allerdings ist das Zählen der abgefließenen Fahrzeuge ein zusätzlicher technischer Aufwand, der mit dem Mehrwert abzuwägen ist.

Schließlich zeigt Abb. 3 die entwickelte Mensch-Maschine-Kommunikation, die beispielsweise auf dem Display der beteiligten Fahrzeuge dargestellt werden kann (weitere Details siehe Ehrhardt, Baumann, Buck, Li, Deml und Vortisch, 2021). Sie ist danach ausgelegt, den Passagieren beider Fahrzeuge die Mehrwerte zu kommunizieren: Die Insassen des gewährenden Fahrzeugs auf dem freien Streifen erhalten eine konkrete Abschätzung der Wartedauer; die Insassen des Fahrzeugs, das schließlich an der Engstelle warten soll, erhalten eine Anzeige, wie sie in der Warteschlange aufrücken. Dies soll die Akzeptanz der Nutzung sicherstellen und damit die praktische Anwendbarkeit der Funktion.

## Evaluation

Während Teile des Systems auch in Realexperimenten untersuchbar sind, kann seine Wirkung im großflächigen, langfristigen Einsatz mit steigenden Durchsetzungsgraden von autonomen, kooperati-

Die »zählende« und die »nicht-zählende« Variante





Grob abgeschätzt **100 Jahre** durchgängiger Verkehr wurden simuliert. Entsprechend reduziert muss die Komplexität der Simulation sein.«



**Abb. 4:** Bild der Szenariosimulation in OCTANE<sup>3</sup> mit einer zweistreifigen Straße auf der eine Fahrtrichtung durch eine Baustelle blockiert ist. Die Fahrzeuge in dieser Richtung müssen in den Gegenverkehr wechseln. Im dichten Verkehr geht das nicht, ohne dass ein entgegenkommendes Fahrzeug die Vorfahrt gewährt.

ven Fahrzeugen (also das, was uns besonders interessiert) nur in Simulationen studiert werden. Dabei gilt, dass jede Simulation nur Annahmen (sog. »Modellannahmen«) über die Realität abbildet. Entsprechend müssen diese Parameter gezielt auf die Fragestellung hin ausgewählt werden. Wir werden in den nachfolgenden Untersuchungen große Anzahlen an Verkehrsteilnehmern betrachten und viele Parameter variieren, sodass die Untersuchungen, grob abgeschätzt, die Messung von knapp 100 Jahren durchgängigen Verkehr abbilden.

Typische Simulationen im automatisierten Fahren beinhalten die Simulation von Umgebungssensoren, Fahrdynamik und detailliertem Verhalten menschlicher Verkehrsteilnehmer. Ein Simulationsschritt entspricht hier in der Regel Bruchteilen einer Sekunde. In diesem Detailgrad wäre eine entsprechend umfangreiche Untersuchung undenkbar – wir müssen also die Komplexität drastisch reduzieren und nur das wesentliche Minimum an Details beibehalten.

### Grundprinzip des Simulationsaufbaus

Die erste Vereinfachung besteht darin, einen Simulationsschritt nicht mehr als festen »Sekundenbruchteil« (bspw.  $\frac{1}{10}$  Sekunde) zu definieren: Stattdessen ist ein Schritt der Simulation immer das Abfließen eines einzelnen Fahrzeugs von einem der beiden Streifen. Wir nummerieren die Schritte mit dem Buchstaben Tau ( $\tau$ ) (von engl. »Turn«, dt. »Runde«, »Spielzug«) wie in Abb. 5 gezeigt.

<sup>3</sup> www.octane.org

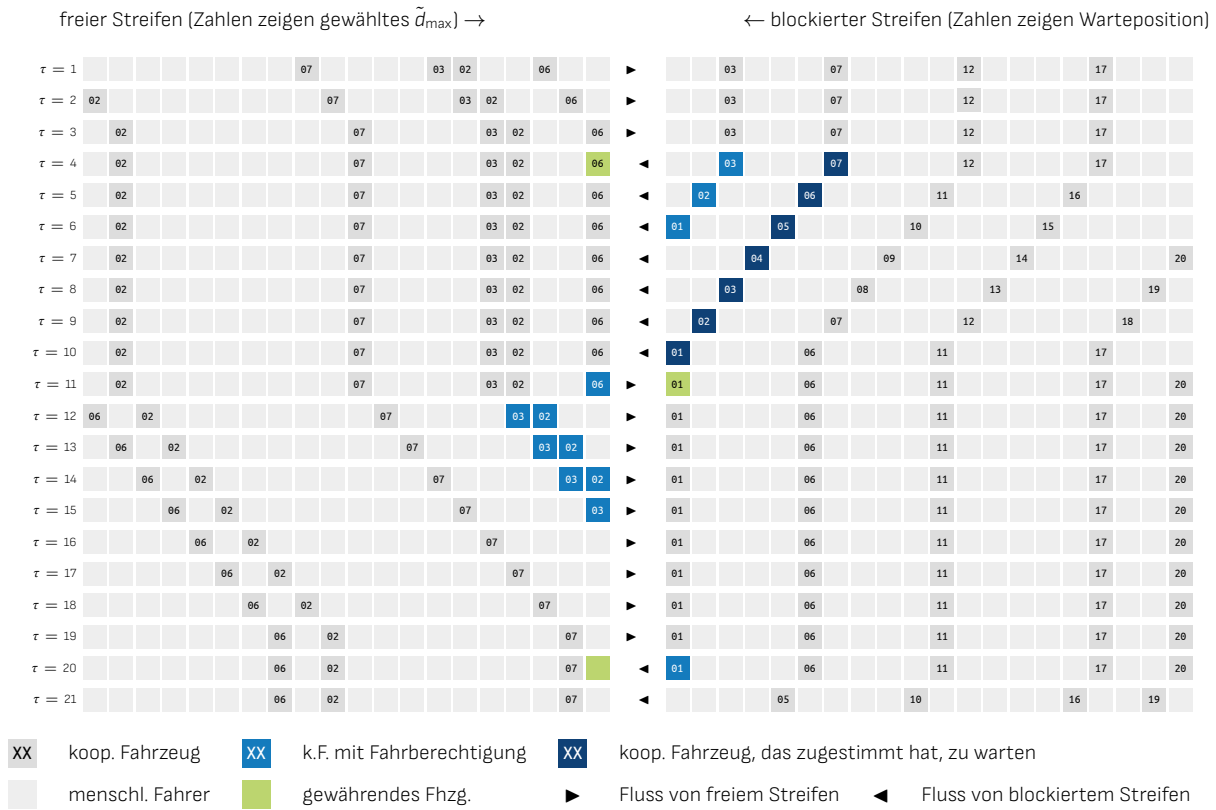
Die detaillierten Fahrbewegungen zwischen den Runden werden nicht berücksichtigt. Wir betrachten außerdem (ebenfalls in Abb. 5) nur die wartenden Fahrzeuge. Sobald ein Fahrzeug abgeflissen ist, verschwindet es sofort aus der Simulation, weil es keinen relevanten Einfluss mehr hat. Wir betrachten jedes Szenario über 50 000 solcher »Runden«, was grob geschätzt drei Tagen Realverkehr an der Engstelle entsprechen würde.

Jedes Szenario hängt außerdem wesentlich von menschlichen Verhaltensweisen ab. Wie höflich fahren die Menschen schon selbst? Was für Kooperationsparameter  $\tilde{d}_{\max}$  wählen die Insassen eines vernetzten Fahrzeugs typischerweise? Das lässt sich heute unmöglich zuverlässig abschätzen und wird sicherlich auch zeitlich und regional stark variieren. Deshalb wählen wir den Ansatz, »alle« Parameterkombinationen durchzuprobieren. »Alle« in Anführungszeichen, weil das eine unendliche Menge wäre – wir tasten in Wirklichkeit nur eine Auswahl an Parametern ab. Aber der Ansatz erlaubt es uns, viele mögliche Konstellationen auszuprobieren, sodass die tatsächliche Realität sich irgendwo durch die Parameterräume entwickeln wird. Vereinfacht gesagt: Wir wissen nicht, wie die Zukunft sich entwickelt, aber wir sind optimistisch, sie (näherungsweise) durch die Simulation abgedeckt zu haben. Damit sind die Ergebnisse der Studie aber deutlich weniger abhängig von sehr zugeschnittenen Annahmen, anhand derer zum Beispiel ein Realversuch durchführbar wäre (innerhalb dessen mit Sicherheit nicht circa 100 Jahre Verkehr untersucht würden).

Schauen wir uns also an, welche Parameter wir in der Simulation variieren, genauer gesagt: Welche »Szenarioparameter« wir einstellen, um ein einzelnes Mal die besagten 50 000 Runden bzw. drei Tage Verkehr zu simulieren.

### Simulationsparameter

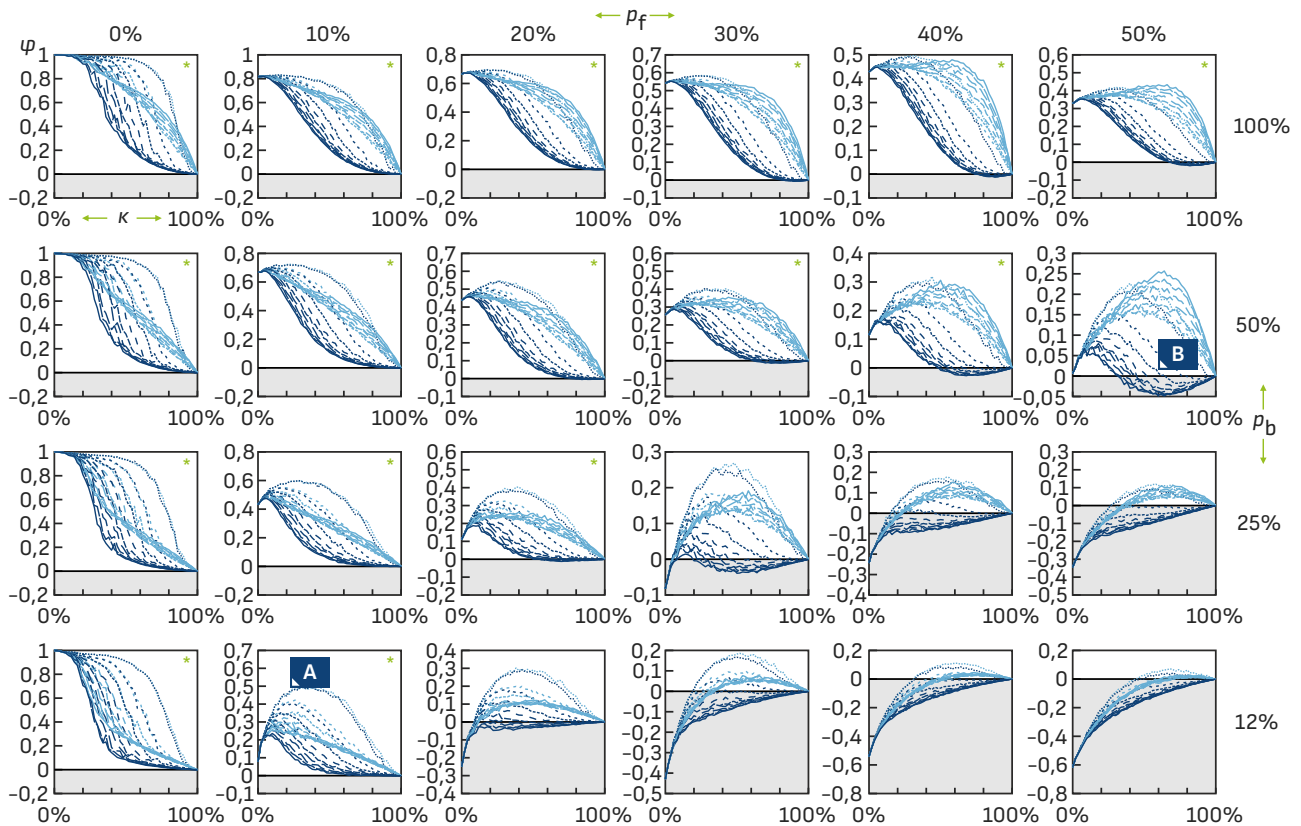
**Die vernetzten Fahrzeuge** Die vernetzten Fahrzeuge verhalten sich entsprechend der vorgeschlagenen Funktion, wobei wir (wie auf Seite 36 diskutiert) zwischen der »zählenden« Variante 6b und der »nicht-zählenden« Variante 6a unterscheiden. Basierend auf der Untersuchung von Funkreichweiten in Kowalewski, 2020 nehmen wir an, dass Fahrzeuge über bis zu 20 Warteschlangenpositionen noch miteinander kommunizieren können, was in etwa 150 m zuzüglich der Länge der Baustelle entspricht, und wir gehen davon aus, dass die Kommunikation so robust ist, dass der (relativ simple) Datenaustausch auf dieser Distanz nicht nennenswert gestört ist. Zum



**Abb. 5:** Auszug aus den simulierten Szenarien aus der rundenbasierten Perspektive, sodass ein Runde (Tau,  $\tau$ ) hochgezählt wird, wenn ein Fahrzeug abfließt. Jede Kiste entspricht einem Fahrzeug. In der Darstellung »verschwinden« abgeflossene Fahrzeuge einfach in der Mitte, sodass je Streifen nur die wartenden Fahrzeuge gegenüberstehend dargestellt sind. Alle Fahrzeuge mit Nummern sind kooperative Fahrzeuge die das System nutzen; nicht nummerierte Fahrzeuge sind menschlich gesteuert (oder automatisiert aber ohne die kooperative Funktion). Die Nummern auf der linken Seite (freier Streifen) zeigen, wie viele entgegenkommende Fahrzeuge das vernetzte Fahrzeug maximal abfließen lassen würde, also  $\tilde{d}_{\max}$ . Die Nummern auf der rechten Seite (blockierter Streifen) zeigen hingegen die Position in der Warteschlange an.

Das Szenario zeigt, dass ein kooperatives Fahrzeug in Runde  $\tau = 3$  mit Einstellung  $\tilde{d}_{\max} = 6$  Vorfahrt gewährt, weil das gegenüber wartende kooperative Fahrzeug mit  $\tilde{d} = 7$  zugestimmt hat, zu warten. Somit ist sichergestellt, dass höchstens 6 Fahrzeuge abfließen. Es gibt noch ein näheres vernetztes Fahrzeug mit  $\tilde{d} = 3$ , das ausdrücklich die Erlaubnis erhält, abzufließen. Alle menschlichen Fahrer auf dem blockierten Streifen fließen ab, das kooperative Fahrzeug hingegen wartet wie versprochen in Runde  $\tau = 10$ , und gibt die Engstelle wieder für den freien Streifen frei. Das gewährende kooperative Fahrzeug auf dem freien Streifen fließt ab, und informiert die nachfolgenden vernetzten Fahrzeuge bis maximal zu Position 6, dass sie abfließen dürfen (praktisch ist das fernste Fahrzeug, das betroffen ist, aber nur 4 Positionen vom Kopf der Schlange entfernt).

Das vernetzte Fahrzeug vorn auf dem blockierten Streifen muss allerdings nicht auf das nächste vernetzte Fahrzeug warten: In Runde  $\tau = 20$  hält ein menschlicher Fahrer auf dem freien Streifen an, und gewährt Vorfahrt. Damit kann das kooperative Fahrzeug abfließen.



**Abb. 6:** Fluss-Metrik  $\varphi$  über unterschiedliche Durchsetzungsgrade kooperativer Fahrzeuge  $\kappa$ , aufgetragen über unterschiedliche menschliche Verhaltensparameter (die Wahrscheinlichkeit  $p_f$  eines menschlichen Fahrers auf dem freien Streifen, die Vorfahrt zu gewähren, und die Wahrscheinlichkeit  $p_b$  eines menschlichen Fahrers auf dem blockierten Streifen, die Vorfahrt zurückzugeben). Je durchgezogener eine Linie, umso höher der Kooperationsparameter  $\tilde{d}_{\max, \text{Grenze}}$ . Hellblaue Linien beschreiben die »nicht-zählende« Variante 6a von Seite 36, dunkelblaue Linien die »zählende« Variante 6b. Im schattierten Bereich  $\varphi < 0$  fließen sogar mehr Fahrzeuge vom blockierten Streifen ab, als vom freien Streifen. Nicht alle Parameterkombinationen sind dabei sehr wahrscheinlich. Die »wahrscheinlicheren« Parameterkombinationen, nämlich die wo Fahrer auf dem freien Streifen selbstbewusster fahren als Fahrer auf dem blockierten Streifen (in unserer Notation:  $p_f < p_b$ ), sind mit einem grünen Sternchen \* markiert. Auf diese kommen wir in Abb. 7 noch einmal zurück.



Wir kennen die Zukunft nicht, aber wir sind optimistisch, sie (näherungsweise) durch die Simulation abgedeckt zu haben.«

Kooperationsparameter  $\tilde{d}_{\max}$  nehmen wir an, dass die menschlichen Insassen ihn zufällig und gleichverteilt wählen zwischen 1 und einem Szenarioparameter,  $\tilde{d}_{\max, \text{Grenze}}$ . Dieser Parameter  $\tilde{d}_{\max, \text{Grenze}}$  erlaubt es uns, gezielt Simulationsszenarien zu erzeugen, in denen die Insassen der vernetzten Fahrzeuge sehr großzügig sind (großes  $\tilde{d}_{\max, \text{Grenze}}$ ) oder sehr ungeduldig (kleines  $\tilde{d}_{\max, \text{Grenze}}$ ). In Formeln:

$$\begin{aligned} \tilde{d}_{\max} &\sim \mathcal{U}_{\mathbb{N}}(1, \tilde{d}_{\max, \text{Grenze}}) \quad \text{and} \\ \tilde{d}_{\max, \text{Grenze}} &\in \{4, 6, 8, \dots, 20\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Wir gehen davon aus, dass im angenommenen dichten Verkehr die Funktion immer aktiv ist und das vernetzte Fahrverhalten vollständig beschreibt.

**Alle anderen Fahrzeuge** Alle Fahrzeuge, die das vorgeschlagene System nicht nutzen, werden in einem stochastischen, also zufallsbasierten Modell zusammengefasst. Das können (in der Realität) menschlich gesteuerte Fahrzeuge sein, aber womöglich auch autonome Fahrzeuge ohne vernetzte Funktionen, oder sogar passende vernetzte Fahrzeuge, bei denen die Insassen die Funktion aber ausgeschaltet haben. Wir unterscheiden hier nicht weiter, sondern gehen davon aus, dass diese »anderen« Fahrzeuge sich stochastisch verhalten.

Das menschliche Verhalten hat für uns zwei Szenarioparameter: Die Wahrscheinlichkeit  $p_f$  (zwischen 0 % und 100 %), dass ein menschlicher Fahrer auf dem freien Streifen anhält und den Gegenverkehr abfließen lässt; und die Wahrscheinlichkeit  $p_b$ , dass



ein Fahrzeug auf dem blockierten Streifen anhält und die Vorfahrt zurückgibt (anstatt beim Abfließen dem Vorderfahrzeug in die Engstelle zu folgen). Wir gehen davon aus, dass bei einem Wechsel der Vorfahrt (ein Fahrzeug hält an und gewährt die Vorfahrt) das jeweils erste gegenüberliegende Fahrzeug mit absoluter Sicherheit abfließt. Die stochastischen Modelle beziehen sich also nur auf die nachfolgenden Fahrzeuge.

Die variierten Parameter (wie in Abb. 6) sind

$$p_f \in \{0\%, 10\%, 20\%, 30\%, 40\%, 50\%\} \quad \text{und} \quad (3)$$

$$p_b \in \{12\%, 25\%, 50\%, 100\%\}$$

**Gesamtsimulation** In der Simulation werden unterschiedliche Durchsetzungsgrade  $\kappa$  ausprobiert, mit

$$\kappa = \frac{\text{Anzahl vernetzter Fhgz.}}{\text{Anzahl aller Fhgz.}} \quad (4)$$

$$\kappa \in \{0\%, 2\%, 4\%, \dots, 98\%, 100\%\}, \quad (5)$$

wobei  $\kappa = 0\%$  dem heutigen Verkehr ohne entsprechend vernetzte Fahrzeuge bezeichnet.

Damit können wir die Anzahl an Parameterkombinationen ausrechnen als

$$N_{\text{Parameter}} = N_{d_{\text{max,Grenze}}} \times N_{p_f} \times N_{p_b} \times N_{\kappa} = 11\,016, \quad (6)$$

und jede dieser Kombinationen wird über die besagten 50 000 Runden simuliert.

Jetzt fehlt noch ein Bewertungsmaßstab für jeden dieser Simulationsdurchläufe. Wir bewerten die »Fairness« des Verkehrsflusses in einem Szenario anhand der folgendermaßen definierten Fluss-Metrik »Phi« ( $\varphi$ ):

$$\varphi = \frac{\left( \begin{array}{c} \text{Anzahl ab-} \\ \text{geflossener} \\ \text{Fahrzeuge} \\ \text{auf freiem} \\ \text{Streifen} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Anzahl} \\ \text{abgeflossener} \\ \text{Fahrzeuge auf} \\ \text{blockiertem} \\ \text{Streifen} \end{array} \right)}{\text{Gesamtzahl aller abgeflossenen} \\ \text{Fahrzeuge}} \quad (7)$$

Nach dieser Berechnung bedeutet ein Wert von  $\varphi = 1$ , dass über den betrachteten Zeitraum nur Fahrzeuge vom freien Streifen abfließen; bei  $\varphi = 0$  herrscht ein ausgeglichener Fluss. Für  $\varphi = -1$  fließen nur Fahrzeuge vom blockierten Streifen ab – in der Praxis ein sehr unüblicher Zustand, den wir auch in unseren Experimenten nicht erreichen (und nicht erreichen wollen).



Es gibt auch einige paradox wirkende Effekte, die nicht dem entsprechen, was man zuerst erwartet hätte. Wir greifen zwei Beispiele heraus, um zu zeigen, was wir aus den Simulationen lernen können.«

### Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen sind in Abb. 6 gezeigt (aufgeschlüsselt nach allen Szenarioparametern), sowie in Abb. 7 (gemittelt über die »wahrscheinlicheren« Parameter). Wir können in diesen Ergebnissen einige sehr interessante Effekte beobachten, die Rückschlüsse über unsere Funktion und sinnvolle Realisierungen geben.

Zuerst können wir sehen, dass jede Variante der Wunschzustand  $\varphi \rightarrow 0$  erreicht, wenn der Anteil der vernetzten Fahrzeuge bis zur vollständigen Durchsetzung ansteigt  $\kappa \rightarrow 100\%$ . Das bedeutet: Der Algorithmus kann »evolutionär« funktionieren und wird besser (statt schlechter) je mehr entsprechende Fahrzeuge im Verkehr sind. Das ist gut, so war es gedacht. Wir können auch sehen, dass die menschlichen Verhaltensparameter einen erheblichen Einfluss haben darauf, wie schnell der Verkehr mit zunehmenden Durchsetzungsgraden »fairer« wird.

Es gibt aber auch einige zunächst paradox wirkende Effekte, die nicht dem entsprechen, was man zuerst erwartet hätte. Eine vollständige Diskussion findet sich in der Originalpublikation, wir greifen hier nur zwei Beispiele heraus, um zu zeigen, was wir aus den Simulationen lernen können.

### Vernetzte Fahrzeuge können »unfaire« Bedingungen sogar verschlechtern

Im Allgemeinen sehen wir den erwarteten Effekt, dass die Fluss-Metrik  $\varphi$  mit höheren Durchsetzungsgrad  $\kappa$  gegen 0 geht, also der Verkehr immer fairer wird. Aber in manchen Verläufen in Abb. 6 sehen wir den gegenteiligen Effekt (insbesondere bei der Markierung **A** in der unteren Reihe): Hier ist der Verkehrsfluss zwischen beiden Fahrstreifen zu Beginn ( $\kappa = 0$ ) schon nahezu ausgeglichen. Doch je mehr vernetzte Fahrzeuge in Verkehr kommen, umso einseitiger fließt der freie Streifen. Wie kann das sein?

Wir finden den Grund darin, dass der Algorithmus tatsächlich asymmetrisch ist, also nicht beide Fahrtrichtungen gleich behandelt. Sein erstes Ziel besteht darin, die Wartezeit der vernetzten Fahr-

zeuge auf dem freien Streifen strikt zu begrenzen, um die Akzeptanz und entsprechend die Nutzungsbereitschaft zu fördern. Erst das zweite Ziel ist das Erreichen eines »fairen« Verkehrsflusses. Wenn ein fairer Verkehrsfluss nur erreicht werden kann, wenn vernetzte Fahrzeuge sehr lange warten, dann entscheidet der Algorithmus implizit zugunsten der freien, vernetzten Fahrzeuge: Wenn wenige vernetzte Fahrzeuge im Szenario sind, und die Insassen den Parameter  $\tilde{d}_{\max, \text{Grenze}}$  sehr klein gewählt haben (d.h. sehr ungeduldig, gepunktete Linien), findet sich auf dem blockierten Streifen sehr selten ein passender Partner. Die vernetzten Fahrzeuge auf dem freien Streifen werden also zu sehr egoistischen Fahrzeugen, die selten oder nie warten. Wenn der menschliche Verkehr hingegen eher großzügig ist, stören vernetzte Fahrzeuge dieses Gleichgewicht. Es ist zu diskutieren, ob das unerwünscht ist: In Bezug auf Fairness ist das eine überraschende Verschlechterung – allerdings stellt der Algorithmus so weiterhin die Akzeptanz der nutzenden Insassen sicher.

**Der Verkehrsfluss kehrt sich um** In einigen Fällen kann der Verkehrsfluss plötzlich zum Vorteil des blockierten Streifens umschlagen. In Abb. 6 ist das überall dort der Fall, wo die Kurven in den grau hinterlegten Bereich  $\varphi < 0$  abtauchen, bspw. bei Markierung **B**. Das passiert, wenn menschliche Fahrer »zu großzügig« sind: Wenn ein vernetztes Fahrzeug abfließt, meldet es den nachfolgenden vernetzten Fahrzeugen, dass sie ebenfalls abfließen dürfen. Kommt zwischen dem gewährenden Fahrzeug und den nachfolgenden vernetzten Fahrzeugen aber noch (mindestens) ein menschlich gesteuertes Fahrzeug, kann dieses die Vorfahrt unabhängig von allen vernetzten Absprachen gewähren. Je häufiger das passiert (und es passiert häufiger mit zunehmendem  $p_f$  und eher geringem  $\kappa$ ), umso häufiger fließen weniger weniger Fahrzeuge vom freien Streifen ab, als zuvor vom blockierten Streifen abgeflossen sind. Es entsteht ein Ungleichgewicht zulasten des freien Streifens.

Durch die stochastische, also zufallsbasierte Simulation, treten beide Effekte in gewissem Umfang bei allen Parameterkombinationen auf – aber unter den »wahrscheinlicheren« Kombinationen, wo  $p_f$  deutlich kleiner ist als  $p_b$ , sollte ihr Einfluss relativ gering sein verglichen mit den Unsicherheiten des menschlichen Verhaltens.

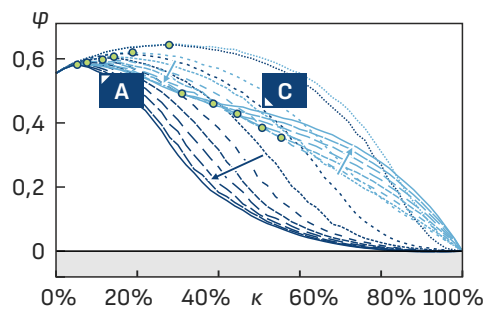
**»Zählend« oder »nicht-zählend«?** Bleibt noch der auf Seite 36 angekündigte Vergleich zwischen der

»zählenden« Variante 6b und der »nicht-zählenden« Variante 6a. Wie dort bereits angedeutet sehen wir in den Kurven, dass die zählende Variante (dunkelblau) deutlich schneller einen »fairen« Verkehrsfluss annähert als die »nicht-zählende« Variante. Es tritt jedoch auch hier ein nicht offensichtlicher Effekt auf, der in Abb. 7 mit **C** markiert ist: Ab einem bestimmten Durchsetzungsgrad flacht bei der »nicht-zählenden« Variante die ausgleichende Wirkung von zunehmendem  $\kappa$  ab, und höhere Kooperationsparameter  $\tilde{d}_{\max}$  führen sogar zu einem weniger fairen Verkehrsfluss (s. Richtung der Pfeile in Abb. 7). Wie ist das zu erklären? Die Hauptursache dafür sind schüchterne menschliche Fahrer auf dem blockierten Streifen. Sehen wir uns das an einem denkbaren Beispiel an. Ein vernetztes Fahrzeug auf dem freien Streifen gewährt großzügig mit  $\tilde{d}_{\max} = 8$  »bis zu 8 entgegenkommenden Fahrzeugen« die Vorfahrt. In dem Szenario sei  $p_b = 50\%$ , das heißt die menschlichen Fahrer auf dem blockierten Streifen sind sehr zurückhaltend – es fließen (wenig überraschend) nur zwei Fahrzeuge ab, das dritte menschliche Fahrzeug auf dem blockierten Streifen stoppt bereits wieder.

Die »zählende« Variante würde jetzt auch nur zwei Fahrzeuge vom freien Streifen abfließen lassen, die »nicht-zählende« Variante hingegen lädt aber acht Fahrzeuge zur freien Fahrt ein. Entsprechend tragen höhere  $\tilde{d}_{\max}$ -Parameter bei der »nicht-zählenden« Variante paradoxerweise nicht immer zu einem ausgeglicheneren Fluss bei, sondern sogar relativ systematisch dazu, dass der freie Streifen vermehrt abfließt. Entsprechend ist die »zählende« Variante 6b diejenige Variante, die deutlich effektiver einen fairen Verkehrsfluss ansteuert.

## Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag haben wir betrachtet, welche diversen Aspekte bei der Entwicklung einer vernetzten Fahrfunktion eine Rolle spielen. Neben allgemeinen Erwägungen als Ausgangspunkt, zum Beispiel das Ziel einer »evolutionären« Erreichbarkeit immer höherer Durchsetzungsgrade, und dem Aspekt der Mensch-Maschine-Interaktion, haben wir besondere Aufmerksamkeit darauf gelegt, wie eine solche Funktion in der Simulation untersucht werden kann, und vor allem, warum Simulation für diese Fragen das Werkzeug der Wahl ist: Während Realexperimente für Teilaspekte wichtig und sinnvoll sind (und tatsächlich auch durchgeführt wurden, zum Beispiel zur Untersuchung von Funkreichweiten oder menschlichem Fahrverhalten), lässt sich die Wir-



**Abb. 7:** Mittelwert über »wahrscheinlichere« Szenarien, konkret diejenigen in Abb. 6 die mit \* markiert sind (d.h.  $p_f < p_b$ ). Pfeile geben den Trend an, wie sich der Fluss über Erhöhung von  $\tilde{d}_{\max, \text{Grenze}}$  verändert. In dieser Abbildung sehen wir typische Effekte deutlicher: Erstens den Übergang **A** von einer anfänglichen Verschlechterung der »Fairness« bei niedrigen  $\kappa$  hin zu einer Verbesserung; und zweitens für die »nicht-zählende« Variante 6a den Übergang von einer kurzen Phase in der  $\tilde{d}_{\max}$  die Fairness verbessert, hin zu einer dauerhaften Phase **C** in der  $\tilde{d}_{\max}$  den Verkehrsfluss systematisch zugunsten des freien Streifens beeinflusst. Dieses Problem vermeidet die »zählende« Variante 6b. Im Gegensatz zu der Gesamtzahl aller Szenarien wie in Abb. 6 dargestellt tritt unter den hier gezeigten »wahrscheinlicheren« Szenarien keine nennenswerte Umkehr des Verkehrsflusses in Richtung des blockierten Streifens auf.



Die Ergebnisse haben uns Einblicke in nicht-offensichtliche Eigenschaften des Systems gegeben, die wir im Projekt auch tatsächlich nur dank der Simulationsergebnisse gefunden und verstanden haben.«

kung in großen Maßstäben (d.h.: tausende oder hunderttausende Fahrzeuge und dauerhafter Betrieb) nicht in der Praxis studieren. Schon für einen Einzelversuch wären erhebliche Aufwände nötig – und die Variation von menschlichem Verhalten ist so groß, dass ein Einzelversuch kaum repräsentativ wäre.

Die Simulation erlaubt uns dagegen die effiziente Durchleuchtung vielfältiger Parameterräume, und zwingt uns dazu, Annahmen transparent offenzulegen und diese in Wissenschaft und Technik durchaus auch kritisch zu diskutieren. Mit dem gewählten Modell konnten wir effizient 11 016 Parameterkombinationen über jeweils circa drei Tage simuliertem Verkehrsgeschehen abprüfen – oder etwa 100 Jahren an unterschiedlichen Verkehrsszenarien. Und wir können mit einiger Sicherheit davon ausgehen, dass wir dadurch »alle denkbaren« Szenarien der

Wirklichkeit zumindest näherungsweise betrachtet haben, was durch Realversuche schlicht unmöglich wäre.

Die Ergebnisse haben uns Einblicke in die Eigenschaften des entwickelten Systems (bzw. zwei seiner Varianten) gegeben, die von der reinen Spezifikation her nicht offensichtlich waren, und die wir im Projekt auch tatsächlich nur dank der Simulationsergebnisse gefunden und verstanden haben (und nicht durch systematische Überlegungen im Vorfeld). In diesem Sinne können Simulationen die Realität sicherlich nicht vollständig ersetzen (zumindest in so reduzierter Modellierung), aber sie können helfen, wichtige Systemeigenschaften noch in frühen Entwicklungsphasen rechtzeitig zu verstehen.

Für die Entwicklung einer gesamten Fahrfunktion sind viele Facetten von Bedeutung, die wir hier nur ansatzweise beleuchtet haben – auch, weil es nicht unser Ziel war, hier eine fertige Funktion für den Serieneinsatz zu entwickeln. Aber es zeigt, wie diverse Faktoren einen Einfluss haben, und wie man diesen Einfluss bemessen kann. Weitere Projektarbeiten finden sich zum Beispiel in Naumann und Stiller, 2017, wo ein Ansatz dargestellt wird, auch in dünnem Verkehr Engstellen mithilfe vernetzter Fahrzeuge effizienter zu durchqueren. Welche Zeitlücken dabei von menschlichen Insassen akzeptiert werden, findet sich in Ehrhardt, Baumann, Buck, Li, Deml und Vortisch, 2021. Eine vollständigere Beschreibung der Untersuchungen dieses Beitrags findet sich in der Originalpublikation Ziehn, Baumann, Beyerer, Buck, Deml, Ehrhardt u. a., 2023.

Auch haben wir einige Vereinfachungen getroffen, die nicht allgemeingültig sind: Zum Beispiel nehmen wir an, dass ein balancierter Fluss optimal ist, bei dem in beide Fahrtrichtungen pro Stunde die gleiche Anzahl an Fahrzeugen abfließt. Wenn jedoch der Bedarf in beide Richtungen unterschiedlich ist (zum Beispiel zur Rushhour nach Feierabend mit einem deutlich höherem Bedarf aus dem Stadtkern heraus als umgekehrt), dann ist ein »ausgeglichener« Fluss nicht unbedingt optimal. Eine tatsächliche Realisierung würde also auch den Bedarf berücksichtigen müssen.

Außerdem haben wir uns hier bewusst nicht damit befasst, welche »Incentives«, also Vorteile, die Insassen der vernetzten Fahrfunktion motivieren würden, diese häufiger und großzügiger einzusetzen. Wir haben lediglich und wie erwartet festgestellt, dass meistens (!) ein großzügigerer Einsatz auch vorteilhaft für den Verkehrsfluss ist. Es ist also vorteilhaft, wenn die Insassen der vernetzten Fahr-



zeuge auch konkrete Vorteile bekommen, wenn sie die Funktion einsetzen – beispielsweise Tank- oder Laderabatte.

Schließlich ist festzuhalten, dass sich die Entwicklung eines solchen Systems nie rein auf eine einzelne Simulationsstudie stützen sollte. Realexperimente sowie komplexere Simulationen können unter ausgewählten Parametern prüfen, ob die hier vorgestellte Simulation zu denselben Ergebnissen kommt, und ob Effekte auftreten, die aus dem vereinfachten Simulationsmodell nicht hervorgehen. Nur das Zusammenspiel unterschiedlicher Methoden kann ein belastbares Bild davon abgeben, ob eine zukünftige Fahrfunktion »gut« oder »schlecht« ist – mit dem gemeinsamen Ziel, den Unterschied zuverlässig festzustellen bevor das System in den Markt, oder auch nur in die Serienentwicklung kommt. ■

## Literaturverweise

- Ziehn, J.R., M.V. Baumann, J. Beyerer, H.S. Buck, B. Deml, S. Ehrhardt u. a. (2023). »Cooperative automated driving for bottleneck scenarios in mixed traffic«. In: *35th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2023), Anchorage, AK, USA, June 4-7, 2023*.
- Baumann, M.V., H.S. Buck, S. Ehrhardt, M. Roschani und P. Vortisch (2021). »Simulation-Based Traffic Assessment of a Connected Automated Driving Function«. In: *Association for European Transport – European Transport Conference 2021*.
- Ehrhardt, S., M.V. Baumann, H.S. Buck, Y. Li, B. Deml und P. Vortisch (2021). »Gap Acceptance at Blocked Lanes on Urban Two-Way Roads and Evaluation of a Bottleneck Assistant«. In: *100th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington D.C., USA.
- Fank, J., Ch. Knies, F. Diermeyer, L. Prasch, J. Reinhardt und K. Bengler (2017). »Factors for User Acceptance of Cooperative Assistance Systems: A Two-Step Study Assessing Cooperative Driving«. In: 8.
- Kowalewski, J. (2020). »Capacity Enhancement by Pattern-Reconfigurable Multiple Antenna Systems in Vehicular Applications«. Englisch. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 146 S. ISBN: 978-3-7315-0997-4. DOI: 10.5445/KSP/1000099791.
- Naumann, M. und Ch. Stiller (Sep. 2017). »Towards Cooperative Motion Planning for Automated Vehicles in Mixed Traffic«. In: *IEEE/RSJ Intl. Conf. Intelligent Robots and Systems Workshops*. Vancouver, Canada. URL: <https://arxiv.org/abs/1708.06962>.



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 Bucherer, S., Rothe, P., Sobek, F., Gottwald, T., Kraljevic, I., Vacca, A., ... & Kulzer, A. (2023). Experimental and Numerical Investigation of Spark Plug and Passive Pre-Chamber Ignition on a Single-Cylinder Engine with Hydrogen Port Fuel Injection for Lean Operations (No. 2023-01-1205). SAE Technical Paper., und kann unter der nebenstehenden Adresse abgerufen werden.



<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2023-01-1205/> (kein Open-Access)

## [FORSCHUNG.KOMPAKT]

Paul Rothe\*

# Anpassung eines Einzylinder-Ottomotors für den Wasserstoffbetrieb und maximale Effizienz



Am Fraunhofer ICT werden Einzylindermotoren für die Brennverfahrensentwicklung konstruiert, simuliert und getestet, um mithilfe von klimafreundlichen Kraftstoffen den Motor der Zukunft zu gestalten. Dabei werden Zündsysteme und Einblasstrategien untersucht und entwickelt, um auch unter anspruchsvollen Randbedingungen ein zuverlässiges und effizientes Brennverfahren sicherzustellen. Besonderer Wert wird dabei im Sinne der Umwelt auf die Vermeidung von Emissionen gelegt.

### → Kontakt

\* Fraunhofer ICT,  
paul.rothe  
@ict.fraunhofer.de

Der Wettlauf gegen die Zeit in Richtung Klimaneutralität ist im Gange und erfordert eine Reduzierung des Verbrauchs fossiler Energieressourcen. Dies setzt sofortige und zuverlässige Entwicklungen im Hinblick auf umweltfreundliche technische Lösungen für den Energie- und Transportsektor voraus. Eine Alternative zu einem kohlenstofffreien Antriebsstrang ist die Verwendung von grünem Wasserstoff für Verbrennungsmotoren. In dieser Arbeit wird der selbstentwickelte Fraunhofer-Einzylindermotor mit einem Hubvolumen von 430 mm<sup>3</sup>, der für magere Verbrennung mithilfe von passiver Vorkammerzündung entwickelt wurde, für den Wasserstoffbetrieb angepasst. Um dies zu erreichen, verfügt der Motor über ein maßgeschneidertes Kühlsystem, das auch bei hohen Lasten niedrige Brennraumtemperaturen sicherstellt, um unerwünschte Zündquellen, sogenannte *Hotspots*, zu vermeiden. Der untersuchte Einzylindermotor ist gekennzeichnet durch ein Verdichtungsverhältnis von 12,2, eine Saugrohrein-spritzung und eine konventionelle Zündkerze. Basie-

rend auf den Ergebnissen wird der Motor zudem mit einer passiven Vorkammerzündkerze betrieben, um deren Einfluss auf die Zündung des Wasserstoffgemisches zu untersuchen. Dabei können die Vorteile der Vorkammerzündung hinsichtlich Brenndauer und Klopfestigkeit insbesondere bei Volllast nachgewiesen werden. Diese Arbeit zeigt darüber hinaus die Möglichkeit auf, durch Optimierung der Einspritzstrategie einen indizierten effektiven Mittel-druck (IMEP)<sup>1</sup> von 23 bar bei Lambda 2 zu erreichen<sup>2</sup>, was in einen indizierten Wirkungsgrad von über 43 % resultiert. Die weitere Leistungssteigerung wird durch die mechanische Belastungsgrenze von 180 bar Zylinderspitzen-druck begrenzt. Da das Brennverfahren in den experimentell untersuchten Betriebsbereichen keinerlei Klopfneigung aufwies, wurde sein Potenzial im Bereich mit höheren Zylinderspitzen-drücken mittels Simulation weiter untersucht. Durch die Optimierung der Brennverfah-

<sup>1</sup> IMEP – »Indicated Mean Effective Pressure«

<sup>2</sup> Lambda (Symbol  $\lambda$ ) beschreibt das Kraftstoff-Luft-Verhältnis im Brennraum. Dabei gilt ein Gemisch mit Luftüberschuss ( $\lambda > 1$ ) als »mager« und mit Kraftstoffüberschuss ( $\lambda < 1$ ) als »fett«. Ein ideales Gemisch ( $\lambda = 1$ ) wird als »stöchiometrisch« bezeichnet.



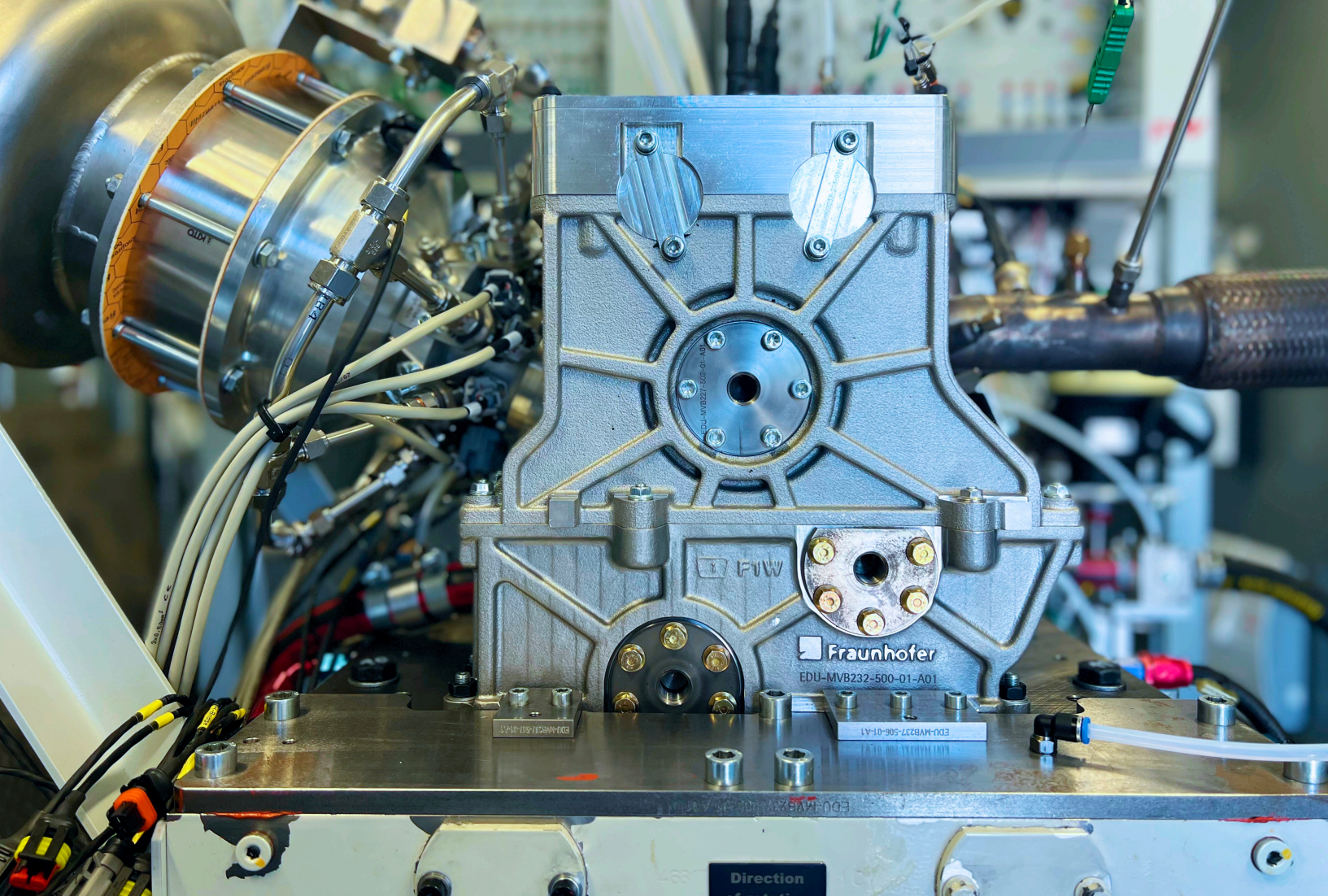


Abb. 1: Fraunhofer-Einzylindermotor



Die Arbeit zeigt die Möglichkeit auf, durch Optimierung der Einspritzstrategie einen Wirkungsgrad von über 43 % zu erreichen.«

rensparameter konnte, bei einem Lambda von 1,5 und dem korrespondierenden Ladedruck von 4 bar, im untersuchten Betriebspunkt der effektive Mittel- druck bis auf 28 bar gesteigert werden.

## Einleitung

Die globale Erwärmung und ihre Auswirkungen auf den Klimawandel sind eine der wichtigsten Aufgaben des 21. Jahrhunderts. Um die globale Erwärmung unter 1,5 K zu halten, ist eine Verringerung der weltweit produzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen um 45 % bis zum Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 2010 erforderlich, wobei das zukünftige Emissionsniveau zur Mitte des Jahrhunderts bei Null liegen soll (Pact, 2021). Diese Situation erfordert sowohl sofortige als auch wirksame Maßnahmen zur Minimierung der Treibhausgasemissionen im gesamten Energiesektor. Im Energie-

und Verkehrssektor ist die Verwendung von grünem Wasserstoff für Verbrennungsmotoren ein möglicher Weg zu einer dekarbonisierten Antriebslösung.

Der Betrieb von Ottomotoren mit Wasserstoff ist eines der wichtigsten Forschungsfelder bei der Entwicklung nachhaltiger Verbrennungsmotoren. Um die unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu Ottokraftstoff zu nutzen, müssen einige Herausforderungen bewältigt werden. Tabelle 1 enthält einen kurzen Vergleich der grundlegenden Eigenschaften von Wasserstoff und Benzin.

Die Dichte von gasförmigem Wasserstoff liegt im Normalzustand weit unter der von Benzin, was dazu führt, dass ein Hochdruckgas- oder Flüssigwasserstoffspeicher erforderlich ist, um die geforderte volumetrische Energiedichte für ausreichende Fahrzeugreichweiten zu erfüllen. Beispielsweise erhöht sich die Dichte von Wasserstoff durch Komprimierung auf einen Druck von 350 bar bei 273 K auf 31 kg/m<sup>3</sup> (Stępień, 2021).

Im Vergleich zu Benzin hat Wasserstoff einen fast dreimal höheren massebezogenen unteren Heizwert und damit eine zehnmal geringere volumetrische Energiedichte im Normzustand. Zusammen-



**Tabelle 1:** Vergleich der wesentlichen physikalischen Kraftstoffeigenschaften von ROZ98 und Wasserstoff bei 300 K und 1013 mbar (Verhelst und Wallner, 2009; Klell, Helmut Eichlseder und Trattner, 2018; Stępień, 2021)

Eigenschaft	Ottokraftstoff ROZ98	Wasserstoff
Molare Masse [g/mol]	84	2
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]*	750–70	0,09
Unterer Heizwert [MJ/kg]*	41,4	120
Energiedichte [MJ/dm <sup>3</sup> ]	31,7	3
Stöchiometrisches Luft/Kraftstoffverhältnis [–]	14	34,3
Heizwert (PFI) [MJ/m <sup>3</sup> ]* **	3,76	3,19
Heizwert (DI) [MJ/m <sup>3</sup> ]* **	3,83	4,52
Flammbereichsgrenzen [λ]	1,4–0,4	10–0,13
Minimale Zündenergie [mJ]	0,24	0,02
Wandabstand Flammenlöschen [mm]	2	0,64

\* bei 273 K bzw. 0 °C, \*\* bei λ = 1

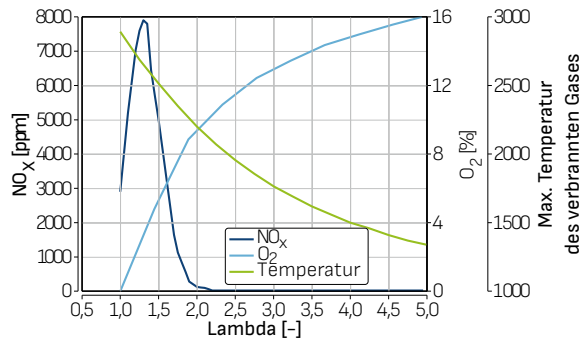
mit dem höheren stöchiometrischen Luft/Kraftstoff-Verhältnis von 34,3 ergibt sich daraus ein geringerer Heizwert und damit ein potenzieller Leistungsverlust von etwa 17 % bei der Saugrohrein-spritzung im Vergleich zu Benzin bei stöchiometrischem Motorbetrieb aufgrund eines geringeren volumetrischen Wirkungsgrads. Wird der Motor im Magerbetrieb betrieben, nimmt der Leistungsverlust zu (Spicher u. a., 2017; Kufferath, Schünemann, Michael Krüger, Krüger, Jianye, Eichlseder u. a., 2021; Bucherer, Rothe, Sobek, Gottwald, Kraljevic, Vacca u. a., 2023).

Wasserstoff bietet große Entflammbarkeitsgrenzen, die einen breiteren Motorbetriebsbereich bis hin zur extrem mageren Verbrennung ermöglichen. Die magere Verbrennung bietet eine Reihe von Vorteilen, indem sie Drosselverluste bei niedrigen Lasten vermeidet und den Wirkungsgrad des Motors bei hoher Last durch Verringerung der Wandwärmeverluste erhöht. Darüber hinaus wird das Risiko unerwünschter Verbrennungsereignisse durch Rückzündung und Vorzündung bei Motoren mit Saugrohrein-spritzung aufgrund der im Vergleich zu Benzin niedrigen Mindestzündenergie von Wasserstoff im Magerbetrieb reduziert (Bucherer, Rothe, Sobek, Gottwald, Kraljevic, Vacca u. a., 2023; Verhelst und Wallner, 2009; White, Steeper und Lutz, 2006). Rückzündungen im Einlasskrümmer werden etwa durch heißes Restgas oder lokale Hotspots im Brennraum bei geöffnetem Einlassventil induziert. Potenzielle heiße Stellen für eine unerwünschte Zündung können Auslassventile, Sitzringe, Zündkerzen, Ablagerungen oder Partikel usw. sowie das heiße Restgas selbst sein (Stępień, 2021). Rückzündungen können reduziert werden, indem verhindert wird, dass vorgemischte Ladeluft direkt nach dem Öffnen des Einlassventils durch einen späteren Einspritzbeginn in den Brennraum gelangt und so das Restgas im Zylinder

verdünnt wird (Berckmüller, Rottengruber, Eder, Brehm, Elsässer, Müller-Alander u. a., 2003). Durch eine späte Direkteinspritzung des Wasserstoffs in den Brennraum z.B. nach dem Schließen der Einlassventile ermöglicht Rückzündungen im Krümmer gänzlich zu verhindern (Stępień, 2021). Aufgrund der hohen Diffusionsfähigkeit von Wasserstoff (fast sechsmal höher als bei Benzin (Klell, Helmut Eichlseder und Trattner, 2018)) kann eine homogene Gemischzusammensetzung von Wasserstoff und Luft in einem weiten Bereich von Einspritzzeitpunkten erzeugt werden, auch bei der späten Einspritzung zu Beginn des Verdichtungshubes.

Da im Brennraum außer der vernachlässigbaren Konzentration aus dem Schmieröl kein Kohlenstoff vorhanden ist, sind die wichtigsten Schadstoffemissionen eines mit Wasserstoff betriebenen Verbrennungsmotors Stickoxide (NO<sub>x</sub>). In Abb. 2 sind die NO<sub>x</sub>-Rohemissionen sowie die Temperatur des verbrannten Gases im Brennraum zusammen mit der Sauerstoffkonzentration in Abhängigkeit von Lambda für einen wasserstoffbetriebenen Motor mit Saugrohreinblasung dargestellt.

Die erzeugten Stickoxidemissionen steigen vom stöchiometrischen Motorbetrieb bis zu einem Maximalwert bei etwa Lambda 1,3 an, bevor sie zu größeren Lambdawerten hin deutlich abnehmen. Thermisches NO<sub>x</sub> macht den größten Teil der erzeugten Stickoxide aus, wobei seine Entstehung von hohen Temperaturen und der Anwesenheit von Sauerstoff abhängt (Van Basshuysen u. a., 2015; Günter und Merker, 2011; Fouquet, 2012). Die Senkung der Spitzentemperaturen führt daher zu einer Verringerung der Stickoxidemissionen im Magerbetrieb. Dies bietet zwei mögliche Strategien zur Verringerung der NO<sub>x</sub>-Emissionen, indem der Motor entweder im stöchiometrischen Betrieb unter Verwendung eines



**Abb. 2:** NO<sub>x</sub>-Rohemissionen über dem Luft/Kraftstoffverhältnis mit Wasserstoff (Klell, Helmut Eichseder und Trattner, 2018)

Drei-Wege-Katalysators oder im ultramageren Betrieb mit Lambda größer 2 betrieben wird. Der Einsatz einer Abgasrückführung kann zu einer weiteren Verringerung der Stickoxidrohmissionen führen (Safari, Jazayeri und Ebrahimi, 2009). Allerdings muss die Temperatur des rückgeführten Abgases gegebenenfalls gesenkt werden, um Verbrennungsanomalien, wie z.B. Vorentflammung oder klopfende Verbrennung zu vermeiden.

Die Deckung des hohen Frischluftbedarfs durch das Ladeluftsystem ist eine Schlüsselkomponente für einen Verbrennungsmotor (Fischer, Sterlepper, Pischinger, Seibel, Kramer und Lorenz, 2022; Srinivas, Vaithianathan Jaikumar, Saravanan, Ramakrishnan Venkateswara, Subash, Mathew u. a., 2015). Die Anpassung der Hardware und der Motorsteuerungsstrategie an die gegebenen Eigenschaften und Anforderungen von Wasserstoff ist entscheidend, um die Ziele des thermischen Wirkungsgrads, der Rohmissionen, des Drehmoments und der Leistung zu erreichen.

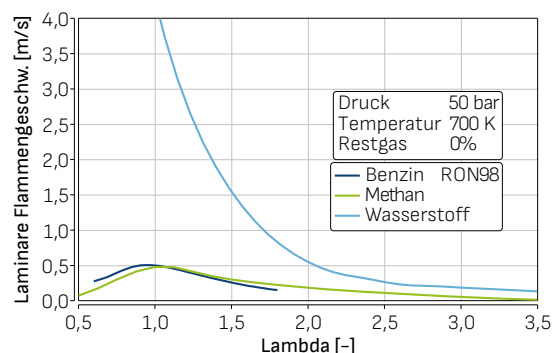
In Abb. 3 und Abb. 4 sind die laminare Flammgeschwindigkeit<sup>3</sup> sowie die Zündverzögerungszeit von Benzin mit einer Oktanzahl von 98 (ROZ)<sup>4</sup>, Methan und Wasserstoff dargestellt. Diese kraftstoffbezogenen Motoreigenschaften wurden anhand eines detaillierten chemischen Mechanismus berechnet, der die genaueste Lösung zur Bewertung dieser Eigenschaften für Temperatur- und Druckbereiche darstellt, die für die Beschreibung des Verbrennungsprozesses im Kontext von Verbrennungsmo-

<sup>3</sup> Die Flammenfront bei der Verbrennung eines vorgemischten Gases breitet sich je nach Turbulenzniveau laminar oder turbulent aus, wobei sich beide Phänomene auch überlagern können. Aus dem Fortschreiten der Flammenfront leitet sich die Flammgeschwindigkeit ab, welche ebenfalls in laminar und turbulent unterteilt werden kann.

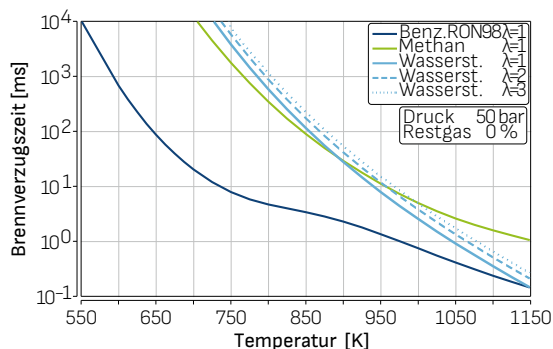
<sup>4</sup> Research-Oktanzahl

toren geeignet sind (Cupo, 2021). Während die Geschwindigkeit der laminaren Flamme von Benzin und Methan vergleichbare Tendenzen aufweist, ist die Geschwindigkeit von Wasserstoff bei Lambda 1 fast zehnmal höher und auch im ultramageren Bereich noch bemerkenswert hoch. Die gute Reproduktion der laminaren Flammgeschwindigkeit von Wasserstoff ist ein Schlüsselfaktor für die erfolgreiche Modellierung der Wasserstoffverbrennung in der reaktiven Strömungssimulation. Der hohe Entflammbarkeitsbereich, die sehr niedrige Zündenergie und die hohe laminare Flammgeschwindigkeit führen dazu, dass Wasserstoff schnelle und kurze Verbrennungseignisse erzeugt, welche die Anforderungen eines nahezu idealen Verbrennungsprozesses – der *isochoren Verbrennung* – erfüllen. Es wird also die Annahme getroffen, dass die Verbrennung bei konstantem Volumen abläuft. Die Kolbenbewegung wird dabei vernachlässigt.

Wenn Wasserstoff einerseits einen schnellen Verbrennungsprozess hervorrufen kann, ist es andererseits wichtig, seinen Widerstand gegen Selbstzündung zu bewerten. Die Klopfestigkeit lässt sich unter anderem durch die Berechnung detaillierter chemischer Mechanismen und der Zündungsverzugszeit des Kraftstoffes modellieren, also der Zeit, die benötigt wird, um eine Selbstzündung des Gemischs bei bestimmten Werten von Druck, Temperatur, Lambda und Restgasgehalt zu erreichen. Aus Abb. 4 geht hervor, dass Methan und Wasserstoff aufgrund der höheren Brennverzugszeit im Vergleich zu Benzin eine wesentlich höhere Klopfestigkeit aufweisen (die ROZ von Methan beträgt 120 (Vacca, Chiodi, Bargende, André Casal Kulzer, Bucherer, Rothe u. a., 2022)). Diese Berechnungen gehen von einer perfekten Vermischung des Kraftstoffes mit Luft aus (perfekte Homogenisierung). Im Falle von Wasserstoff ist die Zündenergie so gering,



**Abb. 3:** Mittels detaillierter Chemie berechnete laminare Flammgeschwindigkeit über Lambda aufgetragen für Ottokraftstoff, Methan und Wasserstoff



**Abb. 4:** Mittels detaillierter Chemie berechnete Brennverzugszeit über der Gastemperatur aufgetragen für Ottokraftstoff, Methan und Wasserstoff

dass das Wasserstoffgemisch zur Selbstentzündung neigt, sobald im Gemisch lokale Bedingungen für die Zündung vorhanden sind, was zu einer Rückzündung oder Vorzündung führt. Daher müssen die chemischen Eigenschaften der Brennstoffe wie die laminare Flammgeschwindigkeit und die Brennverzugszeit unter Einbezug des realen Strömungsfeldes eines Verbrennungsmotors berücksichtigt werden.

## Motorsetup

Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Einzylindermotor wurde von Fraunhofer für eine ultramagere Verbrennung mit Benzin und den Einsatz eines passiven Vorkammerzündsystems entwickelt. Die Zylinderkopfgeometrie folgt einem speziellen Konzept mit geringem Tumble<sup>5</sup>, aber hoher Turbulenz, wenn sich der Kolben in der Nähe des oberen Totpunkts befindet. Die technischen Daten des Motors sind in Tab. 2 aufgeführt.

Der Aluminium-Zylinderkopf mit zwei obenliegenden Nockenwellen besitzt Auslassventile mit 28 mm Durchmesser, Einlassventile mit 30 mm Durchmesser bei flachen Ventilwinkeln. Die M10-Zündkerze ist in zentraler Position zum Brennraum angebracht, um die Spülung der Vorkammer zu unterstützen, falls sie verwendet wird (Villforth, Andre Casal Kulzer, Deeg, Vacca, Rossi, Cupo u. a., 2021; Schmid, Kraljevic, Gottwald, Sobek, Bargende, Chiodi u. a., 2021; Shinda und Karunamurthy, 2021). Der Brennraum ist mit einem Verdichtungsverhältnis von 12,2 ausgelegt und der zugehörige Kolben ist aus Stahl, mit einem integrierten Kühlkanal, gefertigt. Der Auslasskanal enthält einen Inconel Port-Liner, welcher das heiße Abgas vom Zylinderkopf abschirmt und so die Metalltemperatur in diesem Bereich reduziert. Der

<sup>5</sup> Tumble bezeichnet eine rotierende Ladungsbewegung, wobei die Drehachse normal zur Zylinderachse angeordnet ist.

Aufbau des Motors auf dem Prüfstand ist in Abb. 1 dargestellt.

Die Wasserstoffeinspritzung erfolgt über acht Einspritzdüsen im Ansaugkrümmer, 145 mm von den Einlassventilen entfernt. Die Bohrung für eine Direkteinspritzung befindet sich unterhalb des Auslasskanals, ist aber bei dieser Applikation verschlossen, da der Motor nur mit Saugrohreinjection betrieben wird.

Als Zündkerze wurde eine Zündkerze des Herstellers Niterra (ehem. NGK) mit Oberflächenentladung, einem Elektrodenabstand von 1,3 mm und einem Wärmewert<sup>6</sup> von 10 verwendet. Der Schwerpunkt bei der Wahl der Zündkerze lag auf der Reduzierung möglicher Hotspots im Brennraum, weshalb eine Entladungszündkerze gewählt wurde. Bei der zweiten getesteten Zündkerze handelte es sich um eine passive Vorkammerzündkerze mit den in Tab. 3 angegebenen Konstruktionsmerkmalen.

## Simulativer Entwicklungsansatz

Die Wasserstoffeinspritzung und ihre Auswirkungen auf die Thermodynamik des Motors wurden durch 3D-CFD<sup>7</sup>-Simulationen untersucht, wobei das gesamte Strömungsfeld des Einzylindermotors und insbesondere der Ansaug- und Abgasdruckbehälter analysiert wurden. Mit dem 3D-CFD-Tool *QuickSim* wurde der Verbrennungsprozess unter Berücksichtigung der Auswirkungen des gesamten Motorzyklus durch RANS-Simulationen (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) für mehrere Zyklen untersucht. Gleiches gilt für das Strömungsfeld in der Vorkammer.

Bei der 3D-CFD-Simulation des Motorzyklus wurden verschiedene konstante Wandtemperaturen für die wichtigsten Motorteile (entsprechend dem jeweiligen Lastpunkt) vorgegeben. Die Gasströmungsdynamik wurde für mehrere Betriebspunkte berechnet und anhand experimenteller Daten validiert, wobei sowohl die herkömmliche Zündkerze als auch die Vorkammerzündkerze berücksichtigt wurden. Anschließend wird das berechnete Motorströmungsfeld zur Durchführung von konjugierten Wärmeübergangssimulationen (CHT) bereitgestellt, um ein genaueres Wandtemperaturströmungsfeld zu berechnen. Das resultierende Wandtemperatur-Strömungsfeld wird dann wiederum als Input für die 3D-CFD-Gasdynamiksimulationen verwendet.

<sup>6</sup> Der Wärmewert ist ein charakteristisches Merkmal einer Zündkerze und gibt an, wie viel Wärme über die Zündkerze abgeführt wird. Dementsprechend stellt sich eine Betriebstemperatur der Zündkerze ein.

<sup>7</sup> CFD, engl. »Computational Fluid Dynamics«, dt. Strömungsmechanik bzw. Strömungssimulation.



**Tabelle 2:** Wesentliche Merkmale der Fraunhofer-Einzylindermotors

Fraunhofer-Einzylindermotor	
Bohrung [mm]	82,5
Hub [mm]	80
Hubvolumen [cm <sup>3</sup> ]	430
Verdichtungsverhältnis [-]	12,2
Einspritzsystem	H <sub>2</sub> Saugrohrenblasung
Einblasdruck [bar]	2–8
Max. Zylinderdruck [bar]	180

**Tabelle 3:** Wesentliche Merkmale der Vorkammerzündkerze (VK)

Passive Vorkammerzündkerze	
Vorkammervolumen [mm <sup>3</sup> ]	460
Verhältnis Vorkammer-/Totvolumen [%]	1,2
Anordnung der Schussbohrungen	Symmetrische Löcher mit 120° axialem Winkel
Ausrichtung der Schussbohrungen	Symmetrische Löcher mit 60° radialem Abstand
Lochanzahl [-]	6
Bohrungsdurchmesser [mm]	1

### 3D-CFD-Simulation des Kühlwassermantels

In den folgenden beiden Abschnitten wird die Kühlung des Einzylindermotors und die daraus resultierende Wärmeverteilung im Betrieb erläutert. Die Vernetzung der Geometrie sowie die CHT-Simulationen selbst wurden mit der Simulationssoftware *ANSYS Fluent* durchgeführt, während die Konvektions-Randbedingungen des Zylinderinnenvolumens wie oben beschrieben aus Simulationen mit QuickSim importiert wurden.

Zum einen wurde der Kühlwassermantel in Bezug auf Strömungsführung und Druckverlust optimiert. Das bedeutet, dass größere Querschnittssprünge sowie starke Richtungsänderungen vermieden wurden. Zum anderen wurde die Kühlmittelführung für die allgemeine Bauteilkühlung optimiert und darüber hinaus kritische Bereiche, die genannten Hotspots, gezielt gekühlt. Dadurch kann das Kühlmedium möglichst nahe am zu kühlenden Bereich gefördert sowie die Querschnittsfläche verengt werden, was in einer lokal höheren Strömungsgeschwindigkeit und damit zu einer besseren Wärmeabfuhr resultiert. Der Kühlmittelmantel ist in Abb. 5 dargestellt.

Das Kühlmittel strömt auf der Einlassseite in Höhe des halben Kolbenhubs auf die Laufbuchse. Etwa ein Drittel des Massenstroms fließt auf der Einlassseite nach oben zum Zylinderkopf und dann um die Sitzringe der Einlassventile. Der Rest umströmt die Kolbenlaufbuchse, wobei Wert darauf gelegt wurde, den oberen Teil, der deutlich höheren thermischen Belastungen ausgesetzt ist, stärker zu kühlen

als den unteren Teil. Anschließend strömt das Kühlmedium auch auf der Auslassseite zum Zylinderkopf und um die Sitzringe der Auslassventile. Der Querschnitt der Überleitungs Kanäle kann durch den Einsatz von Ausgleichsscheiben variiert und so die Massenstromverteilung zuverlässig eingestellt werden. Zentral über dem Brennraumdach werden die Kühlwege wieder zusammen- und nach oben abgeführt, um die zentrale Zündkerze großflächig zu kühlen.

Der Druckabfall des gesamten Kühlwassermantels beträgt 68 mbar bei einem Volumenstrom von 21,4 l/min. Der Volumenstrom wird linear in Abhängigkeit von der Drehzahl geregelt. Der hier simulierte Volumenstrom entspricht dem ebenfalls im nächsten Abschnitt über CHT-Simulationen betrachteten Betriebspunkt 7 bei 2000 U/min und 23 bar indiziertem Mitteldruck. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Bereich des Brennraumdaches beträgt 1,4 m/s. Aufgrund der optimierten Stromlinie und der vergleichsweise engen Strömungsquerschnitte ist die gemittelte Strömungsgeschwindigkeit annähernd linear zum Volumenstrom und damit zur Drehzahl.

### 3D-CHT-Simulation des Zylinderkopfs

Bei der CHT-Simulation wird die Wärmeübertragung zwischen der Gasphase, den Festkörper und dem Wassermantel gekoppelt betrachtet. Konkret werden die wandnahe Gastemperatur und der Wärmeübergangskoeffizient zeitlich über ein *Arbeitsspiel* (einen Kreisprozess-Umlauf, das heißt 720° Kurbelwinkel), gemittelt und mit der äußersten Wand-

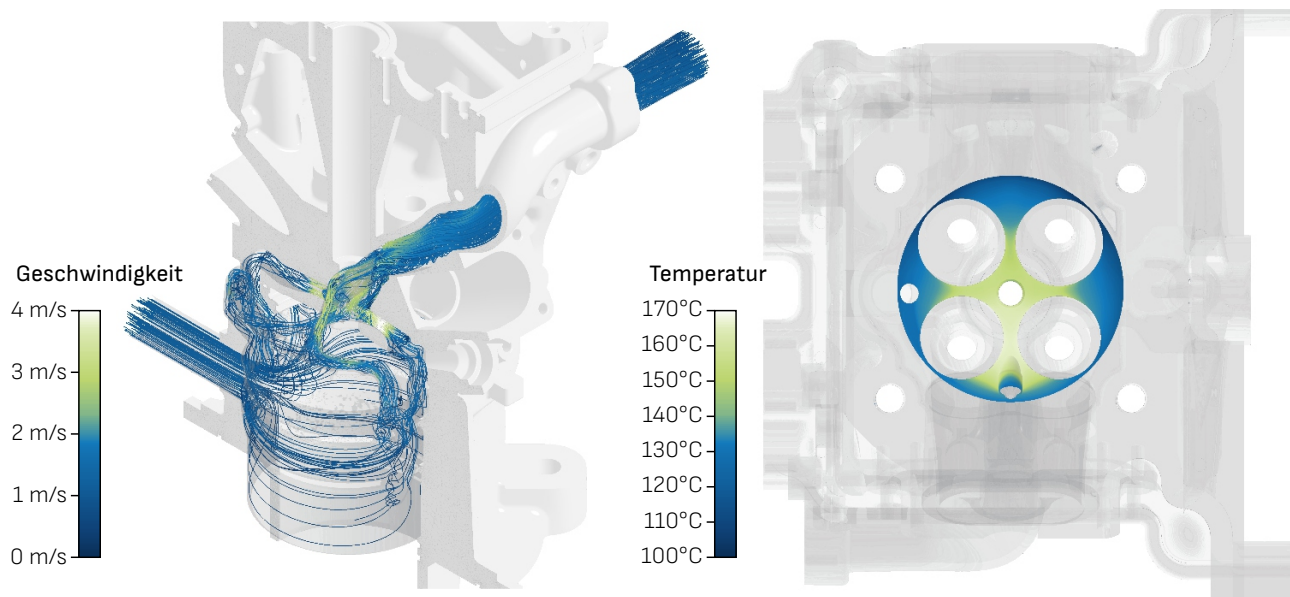


Abb. 5: Stromlinien des Kühlwassers (links) und Temperaturverteilung am Brennraumdach (rechts)

schicht in ein thermodynamisches Gleichgewicht gebracht. Gleichzeitig wird die Wärme im Inneren des Festkörpers verteilt und wird zum Teil in den Kühlwassermantel übertragen, an dessen Grenze sich ebenfalls ein thermodynamisches Gleichgewicht einstellt. Das Ergebnis ist eine stationäre Temperaturverteilung im Inneren des Zylinderkopfes sowie in den simulierten An- und Einbauteilen. Die hier vorgestellten Simulationen berücksichtigen die Sitzringe, Ventile und Ventilschaftführungen, das Zylindergehäuse einschließlich Stehbolzen, die Laufbuchse sowie die Zündkerze mit Elektrode und Isolator. Alle Komponenten sind mit ihren jeweiligen Materialeigenschaften definiert, wobei Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von besonderer Bedeutung sind.

Die hier gezeigten Ergebnisse der CHT-Simulation beziehen sich auf einen aufgrund des hohen Drehmoments thermisch anspruchsvollen Betriebspunkt mit 2000 U/min und 23 bar indiziertem Mitteldruck. Die Konvektions-Randbedingungen der Gasphase wurden wie beschrieben in die 3D-CHT-Simulation importiert, woraufhin die resultierenden Wandtemperaturen wiederum in die 3D-CFD-Simulation eingegeben wurden. Dieser iterative Austausch wurde mehrmals durchgeführt, bis die Ergebnisse einen stationären Zustand erreichten. Die berechnete Temperaturverteilung an der Brennkammerdecke ist in Abb. 5 dargestellt.

Der Bereich mit den höchsten Wandtemperaturen im Brennraum befindet sich zwischen den Auslassventilen. Die maximale Temperatur beträgt hier 163,4 °C. Daneben ist das Ergebnis einer effektiven

Kühlung der Zündkerze deutlich zu erkennen. Dies wirkt sich vor allem in dem hier betrachteten Drehmomentstarken Betriebspunkt positiv auf den Verbrennungsprozess aus. Die vergleichsweise homogene Temperaturverteilung an der Brennraumdecke reduziert zum einen die Bauteilbelastung durch thermodynamische Einflüsse und unterstützt zum anderen den Verbrennungsprozess durch Vermeidung von Hotspots. Die Entwicklungsziele eines effizienten und zuverlässigen Wärmemanagements können somit nachgewiesen werden.

## Prüfstandsergebnisse

Für einen validierten Vergleich zwischen der konventionellen und der passiven Vorkammerzündkerze wurden verschiedene Motorbetriebspunkte untersucht. Der Motor wurde mit beiden Zündsystemen für die in Tab. 4 aufgeführten Betriebspunkte getestet.

Je nach Betriebspunkt werden die Brennverzugszeiten (Zeitdifferenz zwischen Zündzeitpunkt und 5 % verbranntem Kraftstoffmassenanteil), die Verbrennungsdauer (Zeitdifferenz zwischen 10 und 90 % verbranntem Massenanteil), die Mitteldruck-Kovarianz, die  $\text{NO}_x$ -Emission sowie der indizierte Wirkungsgrad ( $\eta_i$ ) für die Hakenkerze (**ZK**) und die passive Vorkammerzündkerze (**VK**) dargestellt und analysiert. Die Lambda-Bewertung basiert auf dem Sauerstoffgehalt  $[\text{O}_2]$  in  $[\text{mol/mol}]$  im trockenen Abgas und folgt der in Gl. (1) angegebenen Berechnung (Lambda calculation based on dry exhaust oxy-

**Tabelle 4:** Übersicht der untersuchten Betriebspunkte am Fraunhofer-Einzylindermotor

Betriebspunkt	Drehzahl [U/min]	Indizierter effekt. Mitteldruck [bar]	Lambda [-]	Abs. Ladedruck p2 [bar]
OP1	1500	3	1,25–3	0,57–0,83
OP2	3000	10	1,5–3	1,48–2,39
OP3	3500	10	1,5–3	1,49–2,42
OP4	4000	10	1,5–3	1,51–2,55
OP5	3000	15	1,5–3	2,15–3,48
OP6	3000	Volllast	2	3,86

gen content (Lejsek, Erik Schünemann, Grabner und Schaffer, 2021))

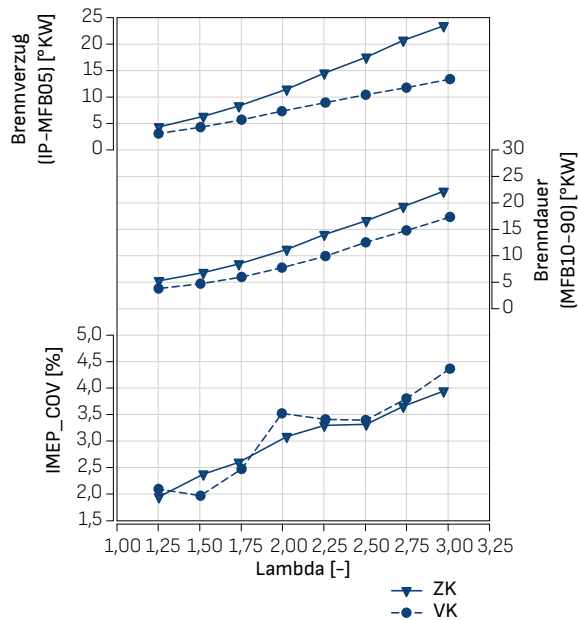
$$\lambda_{\text{exh}} = \frac{[\text{O}_2] - 1}{4,7733[\text{O}_2] - 1} [-] \quad (1)$$

Um eine Konsistenz und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden einige Randbedingungen für alle Betriebspunkte gleich gesetzt. Die Ansaugtemperatur T2 wurde auf 40 °C gehalten. Da der Einzylindermotor ohne Turbolader betrieben wurde, wurden der Ansaugdruck p2 und der Abgasdruck p3 ohne ein definiertes Druckgefälle aus einem Turboladerkennfeld identisch gesetzt. Um den Winkel des 50 %igen Gesamtverbrennungsanteils (MFB50)<sup>8</sup> bei 8° KW zu halten, wurde der Zündzeitpunkt entsprechend variiert. Das Ende der Einspritzung wurde in Abhängigkeit vom Lastpunkt variiert und für die Lambda-Variation über den gesamten Lastpunkt gleich gehalten.

**Betriebspunkt OP1: 1500 rpm, 3 bar pmi**

Für diesen niedrigen Lastpunkt wurde der Motor bei 1500 U/min und 3 bar Mitteldruck in einem weiten Lambda-Bereich von 1,25 bis 3 betrieben. Die Hakenkerze (ZK) und die passive Vorkammerzündkerze (VK) zeigen die erwartete Tendenz zu einer Zunahme der Brenndauer bei größerem Lambda, wie in Abb. 6 dargestellt.

Aufgrund der höheren Turbulenz und des Impulses der Zündstrahlen bei der Vorkammerzündkerze sind die Brenndauer und der Brennverzögerung hier bei kürzer als bei der Hakenkerze, wobei der Effekt zu einem größeren Lambda hin zunimmt. Der Betrieb des Motors bei solch niedriger Last ist eine Herausforderung für die passive Vorkammerzündkerze in Bezug auf benzinbetriebene Motoren (Pischinger, Geiger, Neff, Thiemann, Böwing und Koßwar, 2002). Aufgrund der schwachen Spülung, die zu einer hohen Restgasmenge in der Vorkammer bei niedriger Last führt, wird der Zünd- und Verbrennungsprozess im Vorkammervolumen behindert. Darüber



**Abb. 6:** Brennverzögerung, Brenndauer und Kovarianz bei 1500 U/min und 3 bar Mitteldruck

hinaus verursachen die Restgasspülung sowie die Gemischbildung bei niedrigen Lasten hohe zyklische Schwankungen. Abgesehen von diesen Effekten war die Kovarianz des Mitteldrucks für beide Zündsysteme ähnlich und blieb über den gesamten Lambda-Bereich unter 4,5 %. Dies ist auf die hohe laminare Flammengeschwindigkeit und die weiten Zündgrenzen von Wasserstoff in Bezug auf unterschiedliche Lambda zurückzuführen, die das magere Gemisch und den hohen Restgasanteil kompensieren.

Abgesehen von diesen Herausforderungen zeigt die Vorkammerzündkerze bei moderatem magerem Gemisch (Lambda zwischen 1,25 und 1,5) einen etwas geringeren Wirkungsgrad als die Hakenkerze, wie in Abb. 7 dargestellt.

Der Betrieb des Motors mit passiver Vorkammerzündkerze bei niedriger Last führt zu einem Anstieg des Wandwärmeverlustes, welcher die Vorteile der kürzeren Verbrennungsdauer und Verbrennungsverzögerung im Vergleich zur Zündkerze bei magerem Gemisch mit Lambda zwischen 1,25 und

<sup>8</sup> MFB50 – »50 % of Mass Fraction Burned«



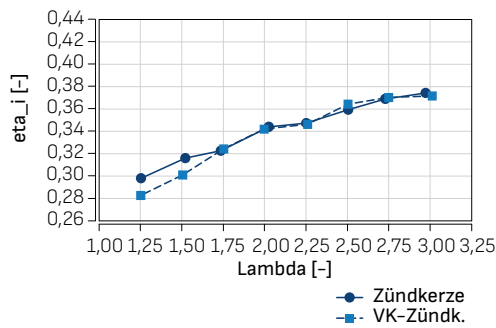


Abb. 7: Indizierter Wirkungsgrad bei 1500 U/min und 3 bar Mitteldruck

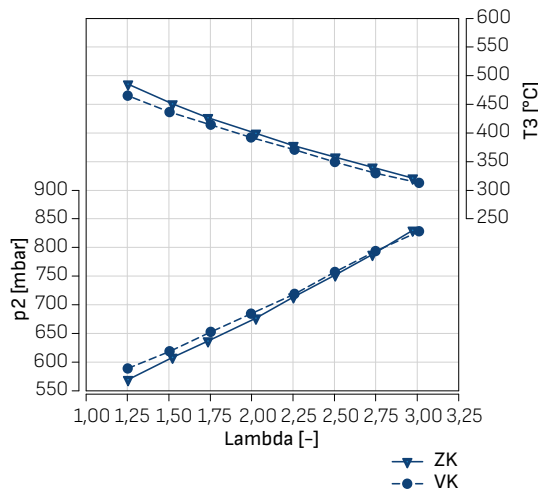


Abb. 8: Abgastemperatur und absoluter Ladedruck bei 1500 U/min und 3 bar Mitteldruck

1,5 überkompensiert. Die kürzere Brenndauer, die durch die Vorkammer induziert wird, führt auch zu einer Verringerung der Abgastemperatur, da die Verbrennung früher einsetzt (siehe Abb. 8). Bei mageren Gemischen als Lambda 1,7 ist der angegebene Wirkungsgrad bei beiden Zündsystemen ähnlich und steigt mit den verringerten Drosselverlusten bis auf etwa 37 %.

Selbst bei niedrigen Lasten und sehr magerem Gemisch kann die Vorkammerzündkerze den Verbrennungsprozess zuverlässig einleiten und eine stabile Verbrennung mit relativ geringer Streuung bewirken (siehe wiederum Abb. 6), was bei benzinbetriebenen Motoren nicht der Fall ist. Hier können niedrige Lasten oft nicht allein durch den Einsatz einer Vorkammerzündkerze erreicht werden, sodass zusätzlich zur Vorkammerzündkerze eine seitliche herkömmliche Zündkerze im Brennraum verwendet wird (Pischinger, Geiger, Neff, Thiemann, Böwing und Koßwar, 2002). Die hohe laminare Flammgeschwindigkeit und die weiten Entflammbarkeitsgrenzen von Wasserstoff im Vergleich zu Benzin werden somit ausgenutzt, wie in Abb. 3 darge-

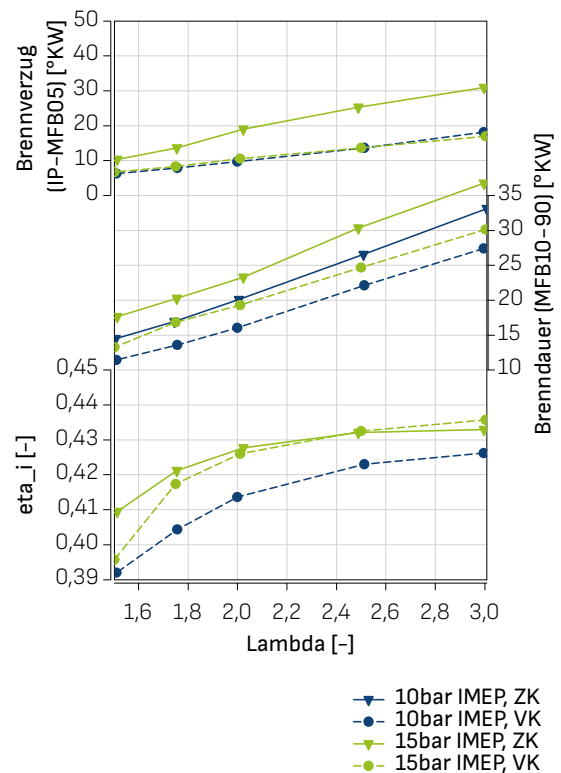


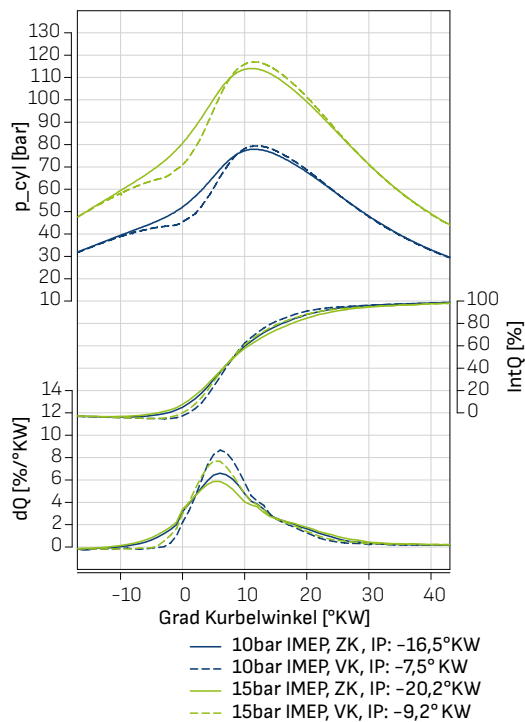
Abb. 9: Brennverzug, Brenndauer und indizierter Wirkungsgrad bei 3000 U/min und 10 beziehungsweise 15 bar indiziertem Mitteldruck

stellt. Daher ist die höhere Menge an Restgas und magerem Gemisch in der Vorkammer nicht so kritisch wie beim Betrieb von Ottomotoren mit flüssigen Kraftstoffen.

#### Betriebspunkte OP2–5: 3000–4000 U/min, 10 bar und 15 bar pmi

Für die mittleren Lastpunkte wurde der Motor bei 3000, 3500 und 4000 U/min mit einem indizierten Mitteldruck von 10 und 15 bar betrieben. Da die Unterschiede zwischen den untersuchten Drehzahl-niveaus marginal waren und ähnliche Phänomene zeigten, wird nur der Betriebspunkt 3000 U/min dargestellt. Wie bereits für den niedrigen Lastpunkt festgestellt, führt auch bei den mittleren Lastpunkten die Verwendung der passiven Vorkammerzündkerze zu einem kürzeren Brennverzug und einer kürzeren Verbrennungsdauer, wie in Abb. 9 für OP2 bis OP5 dargestellt.

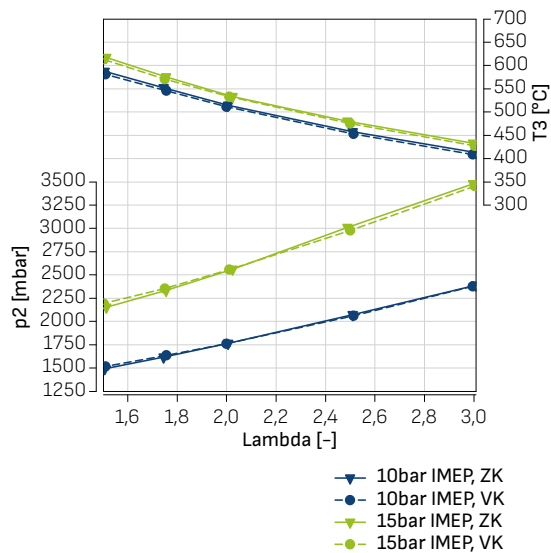
Insgesamt sind die gezeigten Tendenzen der Thermodynamik des Motors sowohl für die niedrigen als auch für die mittleren Lastpunkte ähnlich. Bei Verwendung der konventionelle Zündkerze ist der Wirkungsgrad bei niedrigen Lambdas höher und bei höheren Lambdas niedriger, mit einem im Vergleich zur Vorkammerzündkerze ähnlichem Niveau für Lamb-



**Abb. 10:** Zylinderdruck, kumulierte Wärmefreisetzung und Kurbelwellenwinkel-aufgelöste Wärmefreisetzung bei 3000 U/min, Lambda 2 und 10 beziehungsweise 15 bar indiziertem Mitteldruck

da zwischen 2 und 2,5. Dieser Effekt beruht auf den Verbrennungseigenschaften des Betriebs einer passiven Vorkammerzündkerze. Abb. 10 zeigt den Zylinderdruck und die Wärmefreisetzung in Abhängigkeit des Kurbelwinkels bei Lambda 2 und verdeutlicht den Unterschied im Verbrennungsprozess zwischen Hakenkerze und passiver Vorkammerzündkerze. Die hohe Turbulenz im Hauptbrennraum, die durch die Durchtrittöffnungen der Vorkammer verursacht werden, führen zu einer kürzeren Verbrennungsdauer mit höherem Wärmefreisetzungsgredienten (Vacca, Rossi, Cupo, Chiodi, André Casal Kulzer, Bargende u. a., 2022). Der Zündzeitpunkt von konventioneller Zündkerze und Vorkammerzündkerze für 10 und 15 bar Mitteldruck ist in der Legende von Abb. 10 angegeben, wobei der Motor mit einer Verbrennungsschwerpunktlage von 8° KW betrieben wird. Der Spitzendruck im Zylinder, der Zylinderdruckgradient und die Wärmefreisetzungsraten sind bei der Vorkammerzündkerze höher, was auf die kurze Verbrennungsdauer und den daraus resultierenden früheren Druck- und Temperaturabfall in der Expansionsphase zurückzuführen ist. Dies korreliert mit den etwas niedrigeren Abgastemperaturen in Abb. 11.

Je magerer der Verbrennungsprozess, desto größer ist der Vorteil der Vorkammer-Zündung im Vergleich



**Abb. 11:** Abgastemperatur und absoluter Ladedruck bei 3000 U/min und 10 beziehungsweise 15 bar indiziertem Mitteldruck

zur konventionellen Zündung mit Hakenkerze und desto höher ist tendenziell der indizierte Wirkungsgrad (siehe Abb. 9). Mit magerem Gemisch nimmt die laminare Flammgeschwindigkeit ab, sodass die Erhöhung der Turbulenz an der Elektrode in der Vorkammer einen hohen Stellenwert einnimmt. Andererseits ist die Flammgeschwindigkeit des Wasserstoffs bei einem stöchiometrischen oder mageren Gemisch bis zu Lambda 2 so hoch, dass die Turbulenzunterschiede an der Elektrode zwischen Hakenkerze und Vorkammerzündkerze weniger wirksam sind und der Einfluss des Vorkammervolumens, das keine Arbeit am Kolben verrichtet, den Wirkungsgrad des Motors mit Vorkammer senkt.

Für alle mittleren Lastpunkte lag die Kovarianz des Mitteldrucks unter 1,4 % und zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Zündsystemen. Die gemessenen NO<sub>x</sub>-Emissionen in Abhängigkeit von Lambda für 10 und 15 bar indizierten Mitteldruck sind in Abb. 12 dargestellt.

Die NO<sub>x</sub>-Messung zeigt ähnliche Emissionsmerkmale für beide Zündsysteme. Obwohl die Verbrennung mit der passiven Vorkammerzündkerze höhere Druckgradienten aufwies, wurden hier im Vergleich zur Hakenkerze bei Lambda-Werten zwischen 1,5 und 3 ähnliche NO<sub>x</sub>-Emissionen gemessen. Die gemessenen Gesamtemissionen entsprechen den in der Literatur angegebenen erwarteten NO<sub>x</sub>-Emissionsdiagrammen (vgl. Abb. 2).

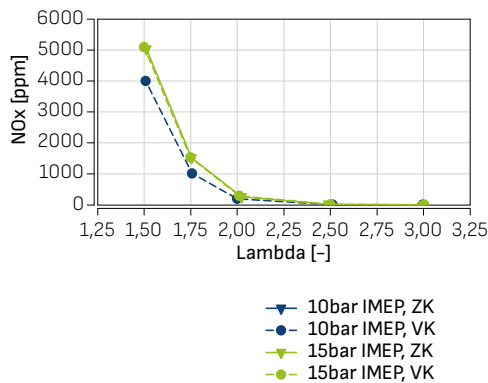


Abb. 12: Stickoxidemissionen bei 3000 U/min und 10 beziehungsweise 15 bar indiziertem Mitteldruck

### Betriebspunkt OP6: 3000 U/min, Vollast

Für den Hochlastpunkt wurde der Einzylindermotor bei 3000 U/min und Lambda 2 betrieben. Der Zylinderdruck sowie die Wärmefreisetzung sind in Abb. 13 dargestellt, wobei der Zündzeitpunkt in der Legende für Hakenkerze und Vorkammerzündkerze angegeben ist.

Da der Motor mechanisch auf einen Zylinderspitzenenddruck von 180 bar begrenzt ist, wurde die mechanische Belastungsgrenze in diesem Betriebspunkt aufgrund der zyklischen Druckschwankungen ( $dp_{cy\_max}$  in part III) erreicht, die zu Spitzendrücken über 190 bar führten. Mit dieser Begrenzung wurde ein indizierter Mitteldruck von 23 bar sowohl für die passive Vorkammerzündkerze als auch für die Hakenkerze erreicht. Der Betrieb des Motors mit einem höheren Lambda führte zu einem höheren Zylinderspitzenenddruck, der den Mitteldruck noch früher begrenzte, während fettere Gemische das Risiko einer möglichen Fehlzündung erhöhten. Daher wurde für diesen Betriebspunkt Lambda 2 gewählt. Der Motor wurde mit beiden Zündsystemen jeweils im gleichen Lastpunkt betrieben, wobei der Zündzeitpunkt aufgrund des Impulses der Vorkammer völlig unterschiedlich war. Obwohl der Lastpunkt jeweils sehr unterschiedliche Verbrennungseigenschaften aufwies, blieb der angegebene Wirkungsgrad des Motors aufgrund der schnellen Verbrennung von Wasserstoff in beiden Fällen gleich.

Selbst bei den hohen Zylinderdrücken von 180 bar traten beim Betrieb des Motors mit dem Verbrennungsschwerpunkt bei  $8^\circ \text{KW}^9$  keine Verbrennungsanomalien wie Vorentflammung, Rückzündung oder Klopfen auf. Dies zeigt, dass der Motor an diesem Punkt nicht an seine thermodynamische Grenze

<sup>9</sup>  $^\circ \text{KW}$  bezeichnet »Grad Kurbelwinkel« als Maß der Drehung der Kurbelwelle. Eine Umdrehung entspricht  $360^\circ$ , ein Zyklus beim Viertakter =  $720^\circ$ .

stößt, was auf die effiziente Kühlung des Zylinderkopfes und somit die Vermeidung heißer Stellen im Brennraum (Hotspots) hindeutet. Darüber hinaus zeigten die  $\text{NO}_x$ -Emissionen für die Vorkammer (406 ppm) eine Verringerung von rund 20 % im Vergleich zu den  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei der konventionellen Zündkerze (515 ppm) für diesen Lastpunkt.

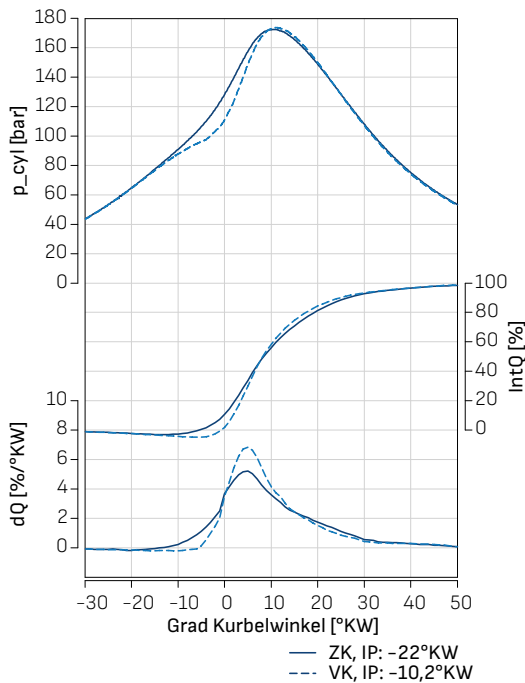
## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein wasserstoffbetriebener Verbrennungsmotor mit Saugrohrinblasung mit einer herkömmlichen Zündkerze und einem passiven Vorkammerzündsystem getestet und validiert. Mit beiden Systemen wurden verschiedene Motorbetriebspunkte bei niedriger, mittlerer und hoher Last untersucht. Es zeigt sich, dass der Betrieb des Motors mit einer passiven Vorkammerzündkerze kürzere Zündverzögerung und Verbrennungsdauer begünstigt, was zu höheren Zylinderdruckgradienten im Vergleich zur konventionellen Zündkerze führt. Die höheren Turbulenzen an der Elektrode in der Vorkammer sowie die Turbulenzen im Hauptbrennraum durch die von der Vorkammer induzierten Fackelstrahlen wirken sich günstig auf den Verbrennungsprozess aus. Einerseits erhöhen sich die Vorteile der Vorkammerzündung, wenn der Motor unter ultramageren Bedingungen betrieben wird (Lambda größer 2,5), wodurch die höheren Wandwärmeverluste überkompensiert werden, was zu einem höheren angegebenen Wirkungsgrad im Vergleich zu der herkömmlichen Zündkerze führt. Wird der Motor hingegen nicht unter ultramageren Bedingungen betrieben (Lambda unter 2,5), können die Vorteile der passiven Vorkammerzündkerze die höheren Verluste nicht kompensieren, was zu einem niedrigeren indizierten Wirkungsgrad im Vergleich zur Brennverfahrensführung mit konventioneller Zündkerze führt. Dieser Effekt zeigt sich in den Testergebnissen für verschiedene Motorbetriebspunkte bei 1500, 3000, 3500 und 4000 U/min und 3, 10, 15 und 23 bar indiziertem Mitteldruck. Innerhalb dieser Betriebspunkte war die Kovarianz des indizierten Mitteldrucks ähnlich und blieb bei beiden Zündsystemen unter 4,5 %.

Die Stickoxidemissionen waren beim Betrieb des Motors mit der passiven Vorkammerzündkerze im Vergleich zur konventionellen Zündkerze im Hochlastbetriebspunkt geringer. Insgesamt entsprachen die gezeigten Emissionskennwerte denen, die bereits in verschiedenen Forschungs- und Literaturarbeiten angegeben wurden.



	IMEP bar	p_max bar	dp_cyl_max bar/°KW	Brennverzug °KW	Brenndauer °KW	eta_i -
— ZK	23,02	173,7	13,38	19,65	27,03	0,433
--- VK	23,00	174,7	15,41	10,85	23,21	0,436



**Abb. 13:** Zylinderdruck, kumulierte Wärmefreisetzung und Kurbelwellenwinkel-aufgelöste Wärmefreisetzung bei 3000 U/min, Lambda 2 und Vollast

Beim Betrieb des Motors mit 3000 U/min und Lambda 2 mit einer geregelten Verbrennungsschwerpunktage auf 8° KW wurden mit beiden Zündsystemen 23 bar Mitteldruck erreicht. Der maximale Spitzenwirkungsgrad lag in beiden Fällen über 43 %. Die maximale Last wurde durch den maximalen Zylinderdruck von 180 bar aufgrund der mechanischen Belastungsgrenze der Hardware begrenzt. Im gesamten untersuchten Betriebsbereich des Motors wurden keine Verbrennungsanomalien beobachtet, was zeigt, dass die thermodynamische Grenze des Motors nicht erreicht wurde. Dies deutet auf ein effizientes Design des Zylinderkopfkühlsystems hin, insbesondere im Hinblick auf die Kühlung potenzieller Hotspot-Bereiche, um anormale Verbrennungsvorgänge erfolgreich zu vermeiden.

Zu beachten ist, dass die verwendete passive Vorkammerzündkerze für Benzin konzipiert und nicht für Wasserstoff angepasst wurde. Um das volle Potenzial eines passiven Vorkammersystems auszuschöpfen, ist eine Optimierung hinsichtlich des Volumens, der inneren Geometrie und des Lochdesigns erforderlich und entscheidend für einen detaillierten Konzeptvergleich.

## Ausblick

Das Potenzial des Betriebs eines wasserstoffbetriebenen Motors mit einer passiven Vorkammerzündkerze wurde mit Saugrohreinspritzung und einem für Benzin abgeleiteten Vorkammerdesign gezeigt. Für zukünftige Untersuchungen sind die folgenden Hardwaremodifikationen und Randbedingungen geplant, um ein tieferes Verständnis der Herausforderungen und Vorteile des Betriebs eines Wasserstoffmotors zu ermöglichen:

- Wasserstoff Direkteinspritzung
- Wassereinspritzung
- Vorkammeroptimierung hinsichtlich Volumen, Geometrie und Lochdesign
- Alternative Zündkerzen
- Variation von Kolbendesign und Verdichtungsverhältnis
- Turboladereignisfeld für anwendungsnahe Lade- und Gegendrücke

Neben der beschriebenen Hardwarekonfiguration und den Randbedingungen ist ein tieferes Verständnis des laufenden Verbrennungsprozesses erforderlich. Die Verknüpfung der virtuellen Simulation mit den Prüfstandsergebnissen zur Anpassung bestehender Modelle und Berechnungen ist ein zukünftiger Schwerpunkt. Der Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera zur Visualisierung der Wasserstoffverbrennung wird dazu beitragen, den Verbrennungsprozess selbst zu untersuchen und wertvolle Informationen für weitere Verbesserungen zu sammeln. Schließlich muss das Phänomen der reduzierten Stickoxid-Emissionsbildung bei Verwendung der Vorkammerzündung im Vergleich zur konventionellen Zündkerze im Hochlastbetriebspunkt genauer untersucht werden. ■

## Literaturverweise

- Bucherer, Sebastian, Paul Rothe, Florian Sobek, Theo Gottwald, Ivica Kraljevic, Antonino Vacca u. a. (2023). *Experimental and Numerical Investigation of Spark Plug and Passive Pre-Chamber Ignition on a Single-Cylinder Engine with Hydrogen Port Fuel Injection for Lean Operations*. Techn. Ber. SAE Technical Paper.
- Berckmüller, M, H Rottengruber, A Eder, N Brehm, G Elsässer, G Müller-Alander u. a. (2003). *Potentials*

- of a charged SI-hydrogen engine. Techn. Ber. SAE Technical Paper.
- Bucherer, Sebastian, Paul Rothe, Florian Sobek, Theo Gottwald, Ivica Kraljevic, Antonino Vacca u. a. (2023). *Experimental and Numerical Investigation of Spark Plug and Passive Pre-Chamber Ignition on a Single-Cylinder Engine with Hydrogen Port Fuel Injection for Lean Operations*. Techn. Ber. SAE Technical Paper.
- Cupo, Francesco (2021). *Modeling of real fuels and knock occurrence for an effective 3D-CFD virtual engine development*. Springer.
- Fischer, Marcus, Stefan Sterlepper, Stefan Pischinger, Jörg Seibel, Ulrich Kramer und Thomas Lorenz (2022). »Operation principles for hydrogen spark ignited direct injection engines for passenger car applications«. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 47,8, S. 5638–5649.
- Fouquet, Marcel (2012). »Niedrigstemissionskonzept für einen wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor«. Diss. Technische Universität München.
- Günter, P und Merker Merker (2011). *Grundlagen Verbrennungsmotoren*. Vieweg+ Teubner Verlag.
- Klell, Manfred, Helmut Eichlseder und Alexander Trattner (2018). *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*. Springer.
- Kufferath, A, E Schünemann, Michael Krüger, M Krüger, S Jianye, H Eichlseder u. a. (2021). »H<sub>2</sub> ICE Powertrains for future on-road mobility«. In: *Proceedings of the 42nd International Vienna Motor Symposium, Vienna, Austria*, S. 29–30.
- Lejsek, David, Erik Schünemann, Peter Grabner und Klaus Maria Schaffer (2021). »Thermodynamic analysis of hydrogen engines with port fuel- and direct injection«. In: *18th Symposium Sustainable Mobility, Transport and Power Generation*. Verlag der Technischen Universität Graz, S. 382–393.
- Pact, Glasgow Climate (2021). »UNFCCC Decision—/CP. 26«. In: URL: <https://unfccc.int/document-3/310475>.
- Pischinger, Stefan, José Geiger, Willi Neff, Jörg Thiemann, Robert Böwing und Hans-Jürgen Koßwar (2002). »Einfluss von Zündung und Zylinderinnenströmung auf die ottomotorische Verbrennung bei hoher Ladungsverdünnung«. In: *MTZ-Motortechnische Zeitschrift* 63.5, S. 388–399.
- Safari, H, SA Jazayeri und R Ebrahimi (2009). »Potentials of NOX emission reduction methods in SI hydrogen engines: Simulation study«. In: *International journal of hydrogen energy* 34.2, S. 1015–1025.
- Schmid, Hans, Ivica Kraljevic, Theo Gottwald, Florian Sobek, Michael Bargende, Marco Chiodi u. a. (2021). *LPG and Prechamber as Enabler for Highly Performant and Efficient Combustion Processes Under Stoichiometric Conditions*. Techn. Ber. SAE Technical Paper.
- Shinda, Balu Jalindar und K Karunamurthy (2021). »Effect of Spark Plug Location on Combustion, Performance and Emission of High-Speed Digital Three Spark Ignition (DTSI) Engine Fueled with Gasoline and Hydrogen«. In: *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility* 4.2021-26-0227, S. 836–846.
- Spicher, Ulrich u. a. (2017). *Ottomotor mit Direkt-einspritzung und Direkteinblasung: Ottokraftstoffe, Erdgas, Methan, Wasserstoff* ed R van Basshuysen.
- Srinivas, Jilakara, V Vaithianathan Jaikumar, Nataraajan Saravanan, R Ramakrishnan Venkateswara, GP Subash, Abraham Mathew u. a. (2015). *An experimental study of turbocharged hydrogen fuelled internal combustion engine*.
- Stępień, Zbigniew (2021). »A comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines: Achievements and future challenges«. In: *Energies* 14.20, S. 6504.
- Vacca, Antonino, Marco Chiodi, Michael Bargende, André Casal Kulzer, Sebastian Bucherer, Paul Rothe u. a. (2022). »Virtual Development of a New 3-Cylinder Natural Gas Engine with Active Pre-chamber«. In: *22. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik*. Springer, S. 429–459.
- Vacca, Antonino, Edoardo Rossi, Francesco Cupo, Marco Chiodi, André Casal Kulzer, Michael Bargende u. a. (2022). *Virtual Development of a Single-Cylinder Engine for High Efficiency by the Adoption of eFuels, Methanol, Pre-Chamber and Millerization*. Techn. Ber. SAE Technical Paper.
- Van Basshuysen, Richard u. a. (2015). »Natural gas and renewable methane for powertrains«. In: *Future. Strateg. Clim. Mobil., 1st edn*. Springer, Berlin, S. 973–978.
- Verhelst, Sebastian und Thomas Wallner (2009). »Hydrogen-fueled internal combustion engines«. In: *Progress in energy and combustion science* 35.6, S. 490–527.
- Villforth, Jonas, Andre Casal Kulzer, Hans-Peter Deg, Antonino Vacca, Edoardo Rossi, Francesco Cupo u. a. (2021). *Methods to investigate the importance of eFuel properties for enhanced emission and mixture formation*. Techn. Ber. SAE Technical Paper.
- White, CM, RR Steeper und AE Lutz (2006). »The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review«. In: *International journal of hydrogen energy* 31.10, S. 1292–1305.

# NUFAM

## DIE NUTZFAHRZEUG MESSE

**JETZT  
TICKETS  
SICHERN!**



**KAMO**  
KARLSRUHE MOBILITY

WIR  
SIND  
DABEI

MESSE KARLSRUHE

**21. - 24.09.2023**

GET THINGS MOVING!

[NUFAM.DE/TICKETS](https://nufam.de/tickets)

messe  
— karlsruhe





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 Moradi, M. H., Heinz, A., Wagner, U., & Koch, T. (2022). Modeling the emissions of a gasoline engine during high-transient operation using machine learning approaches. *International Journal of Engine Research*, 23(10), 1708–1716., und kann unter der nebenstehenden Adresse abgerufen werden.



<https://doi.org/10.5445/IR/1000135485> (Open Access Postprint)

## [FORSCHUNG.KOMPAKT]

Alexander Heinz\*

# Modellierung der Emissionen eines Benzinmotors während hochdynamischen Betriebs durch maschinelles Lernen



Um einen Verbrennungsmotor hinsichtlich Emissionen und Effizienz zu optimieren, benötigt man Modelle, die wechselhaften (»transienten«) Betrieb realistisch und echtzeitfähig abbilden. In dieser Arbeit zeigen wir, wie und weshalb Verfahren der künstlichen Intelligenz – genauer gesagt des maschinellen Lernens – genutzt werden können, um die  $\text{NO}_x$ - und HC-Rohemissionen (vor Abgasnachbehandlung) bei einem Sechszylinder-Ottomotor vorherzusagen. Die Verfahren sollen das Verhalten eines Motors »erlernen«, um es dann in Simulationen realistischer wiedergeben zu können – insbesondere für realistischen, wechselhaften Betrieb des Motors.

### → Kontakt

\* Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Institut für Kolbenmaschinen (IFKM),  
[alexander.heinz2@kit.edu](mailto:alexander.heinz2@kit.edu)

In der Motorenforschung sowie in der Fahrzeugindustrie wird seit Jahrzehnten anhand von immer schärfer werdenden Emissionsvorgaben an der Verbesserung des Schadstoffausstoßes von Fahrzeugen und Motoren geforscht und entwickelt. Der hier besprochene Journalbeitrag beschäftigt sich mit der Modellierung dieser Schadstoffemissionen in Realfahrmanövern. Neben einer kurzen

Zusammenfassung des Beitrags werden die wichtigsten Konzepte rund um den hier vorgestellten Ansatz erklärt.

## Warum überhaupt Modellierung von Emissionen – und was sind eigentlich Realfahremissionen?

In der Vergangenheit wurden Fahrzeuge ausschließlich auf Rollenprüfständen unter sehr genau eingeschränkten Umgebungsbedingungen zertifiziert. Dies ist im Grunde auch heute so. Es wird ein Geschwindigkeitsprofil – der WLTC-Fahrzyklus<sup>1</sup> – vorgegeben und das Fahrzeug wird so in einem genau bekannten Geschwindigkeitsbereich bewegt. Es ist also insbesondere aus der Sicht des Motors bekannt, welche Betriebsbereiche abgefahren werden und damit besonders wichtig für Verbrauch und Emissionen sind. Der Fahrzyklus soll dabei einen breiten Betriebsbereich abdecken, ist aber verglichen mit Aufzeichnungen von realem Fahrverhalten teilweise nicht dynamisch genug.

<sup>1</sup> Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles

In der aktuellen Gesetzgebung gibt es darüber hinaus zusätzlich Straßentests. In diesen RDE-Tests<sup>2</sup> wird das Fahrzeug im normalen Straßenverkehr bewegt und die Emissionen mittels eines portablen Emissionsmessgeräts (PEMS) untersucht. Dabei werden breite Randbedingungen an die Umgebung und die Strecke zugelassen. Ein Fahrzeug muss also in verschiedensten Betriebszuständen die Emissionsgrenzwerte einhalten. Dabei muss eine Mindest- und eine Maximaldynamik – also Beschleunigung – eingehalten werden, damit die Tests nicht zu »sanft« oder aggressiv gefahren werden.

In der Motorenforschung ist die Abbildung des ersten Tests am Motorenprüfstand vergleichsweise einfach und wird schon länger umgesetzt. Für die Abbildung des RDE-Tests haben die Autoren einen Engine-in-the-Loop-Ansatz verfolgt. Dabei wird mittels verschiedener Modelle für das Fahrzeug (inklusive Kupplung und Getriebe, die Umgebung – also Straße, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Ampeln – und den Fahrer) der Motor »virtuell eingebaut«. Dadurch lassen sich auch komplexe Fahrsituationen realitätsnah untersuchen.

In mehreren Forschungsprojekten wurden diese Modelle aufgebaut und validiert. Da RDE-Tests ca. 90 min lang sind, stellen diese Tests am Motorenprüfstand viel investierte Zeit dar. Man möchte also lieber weniger Tests mit einem hohen Informationsgehalt erzeugen.

Um dieses Ziel zu erreichen werden Modelle für das Emissionsverhalten des Motors erstellt. Dafür werden konventionell die erwünschten Werte in Abhängigkeit von Steuergrößen des Motors ermittelt. Wenn es gelingt, ein gutes Modell für den Motor zu erstellen, dann kann mit dem Modell der Betrieb des Motors optimiert werden, ohne dass der Prüfstand betrieben werden muss. Es gibt für die Art der Modelle verschiedene Ansätze, die von einfachen Geraden- oder Parabelgleichungen bis hin zu komplexen mathematischen Ansätzen reichen. In den letzten Jahren haben sich »Künstliche Neuronale Netze« (KNN) als sehr vielseitig erwiesen, also eine Methode der Künstlichen Intelligenz (KI) und des maschinellen Lernens (ML).

Die Autoren wollen mit ihrer Untersuchung die folgenden Fragen beantworten:

- Lassen sich direkt aus simulierten RDE-Fahrten die nötigen Modelle für Emissionen gewinnen? Die Alternative hierzu wären zusätzliche kürzere Versuchsläufe, die die Datenbasis für die Modellbildung erweitern müssten.

**Tabelle 5:** Technische Motordaten

Typ	Benzindirekteinspritzung
Zylinder	R6
Hubraum	2979 cm <sup>3</sup>
Kompression	10.2:1
Injektorposition	zentral
Ventilsteuerzeiten	variabel
Ansaugsystem	Abgasturbolader
Leistung	225 kW bei 5800 rpm
Drehmoemnt	400 Nm bei 1200–5000 rpm
Emissionsklasse	Euro V
Treibstoff	Super E5

- Sind maschinelle Lernverfahren, wie KNN, für die über die Zeit sehr komplexen Zusammenhänge zwischen Fahrzeug-/ Motorzustand und Rohemissionen geeignet?
- Und wenn ja: Welche Art dieser Verfahren?

## Inhalt des Papers

Im folgenden sollen die einzelnen Abschnitte des Papers kurz besprochen werden. Der Inhalt wird dabei in kompakter Form umschrieben. Auf eine Wort-zu-Wort-Übersetzung wird bewusst verzichtet.

### Experiment und Ergebnisse der Prüfstandsexperimente

Wie bereits erwähnt kam ein Engine-in-the-loop-Ansatz zum Einsatz. Schematisch ist der Versuchsaufbau in Abb. 1 dargestellt. Dabei wurden die gasförmigen Emissionen mittels verschiedener Analytoren kontinuierlich erfasst. Wichtig für diese Untersuchung sind dabei Stickoxid- (NO<sub>x</sub>) und unverbrannte Kohlenwasserstoff- (HC) Emissionen. Dabei wird das zu untersuchende Abgas vor der Abgasnachbehandlung entnommen. Damit ist das Abgas nicht »gereinigt« und es können die direkten Emissionen des Motors untersucht werden. Bei dem Ottomotor handelt es sich um einen Reihensechszylinder mit Direkteinspritzung und Abgasturboaufladung. Einige Daten finden sich in Tab. 5. Dabei wird möglichst ein seriennahes Motorsteuergerät verwendet. Dies führt dann dazu, dass sich der Motor im Experiment so verhält wie der gleiche Motor eingebaut im Fahrzeug auf der Straße.

Mit diesem Versuchsaufbau wurden Versuche auf drei virtuellen Strecken durchgeführt. Diese Strecken bilden reale Straßen im Umfeld von Karlsruhe, Heilbronn und Stuttgart ab. Dabei sind sowohl die Verläufe als auch die Beschilderung und Ampeln be-

<sup>2</sup> Real Driving Emissions

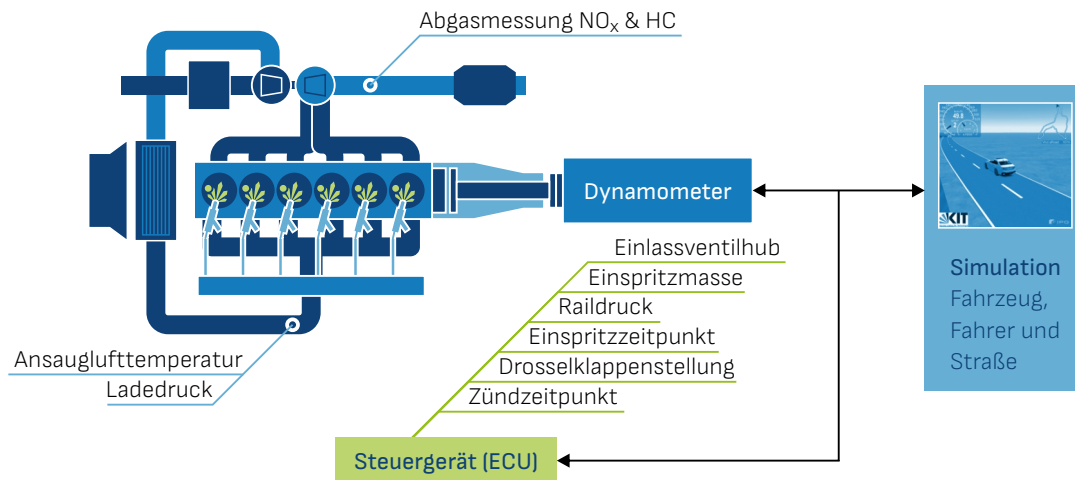


Abb. 1: Experimentalsetup als Verbindung von Motor, Steuergerät und Simulation

rücksichtigt. Bei den Tests wurden allerdings nicht alle Randbedingungen für RDE-Straßentests eingehalten:

- Der Motor wurde künstlich auf einer konstanten Temperatur im Kühlmittel von 85° C gehalten. Dies hatte den Grund, dass die Untersuchung vergleichbar zu anderen Tests am Prüfstand sein sollte. Der Nachteil ist, dass in der Realität insbesondere kalte Motorzustände direkt nach Motorstart die meisten Herausforderungen für Emissionsoptimierung beinhalten.
- Es wurden ausschließlich Rohemissionen entnommen. Bei Straßentests werden hingegen die Emissionen erst nach der Abgasreinigung entnommen.
- Der Dynamikparameter  $v_{a_{pos,95}}$  wurde überschritten. Das bedeutet, dass die Tests deutlich dynamischer sind, und damit ein breiterer Betriebsbereich des Motors abgedeckt wird. Dies ist wichtig, damit für die Modellgenerierung eine möglichst breite Datenbasis zur Verfügung steht.

Die Datenbasis besteht aus neun Läufen. Jede Strecke wurde mit drei verschiedenen Fahrerkonfigurationen gefahren. Die virtuellen Fahrer unterscheiden sich hauptsächlich bezüglich maximaler Beschleunigung und Schaltverhalten. Die Daten zum Training des KNN wurden ausschließlich aus diesen Versuchsläufen generiert.

Abb. 2 zeigt im Beispiel, wie dynamisch die Daten der Prüfläufe sind. Das Schaltverhalten und damit die Motordrehzahlgrenze wird durch die Fahrerparametrierung sowie die Fahrpedalstellungsgrenze gesteuert. Wie aus diesem Beispiel ersichtlich wird, führen die Fahrereingaben und der simulierte Stra-

ßenverlauf zu stark transienten Lastanforderungen und Motordrehzahlen. Da kein Verkehr simuliert wurde, wird die resultierende simulierte Fahrzeuggeschwindigkeit durch das Tempolimit und die Querbeschleunigungsgrenzen für Kurvengeschwindigkeiten bestimmt. Spitzenwerte der HC-Emissionen treten häufig bei Lastwechseln von einer höheren zu einer niedrigeren Last auf.

Bei der genaueren Auswertung der Fahrdynamik stellt sich heraus, dass jeweils der aggressivste Fahrer über der erlaubten Dynamik liegt. Tab. 6 zeigt eine Übersicht über Fahrzeuggeschwindigkeit und Dynamikbereich der verwendeten RDE-Läufe. Die Fahrerkonfigurationen führen zu dynamischen Parametern, die unter dem Grenzwert (»niedriger«), nahe dem Grenzwert (»mittel«) und über dem Grenzwert (»höher«) der Verordnung liegen.

### Die verwendeten Ansätze des maschinellen Lernens

In diesem Paper wurden verschiedene Ansätze untersucht. Sie unterscheiden sich vor allem in der Topologie der Netze. Herauszuheben hier der »Long Short-Term Memory«-Ansatz (LSTM, dt.: langes Kurzzeitgedächtnis). Dieser unterscheidet sich von Ansätzen mit KNN vor allem in der Möglichkeit, dass bei der Bestimmung der momentanen Emissionen auch Zeitschritte in der Vergangenheit berücksichtigt werden können. Damit ist er vielversprechend für die Analyse der transienten Prüfläufe. Eine genauere Beschreibung der Ansätze findet sich in der Originalveröffentlichung.



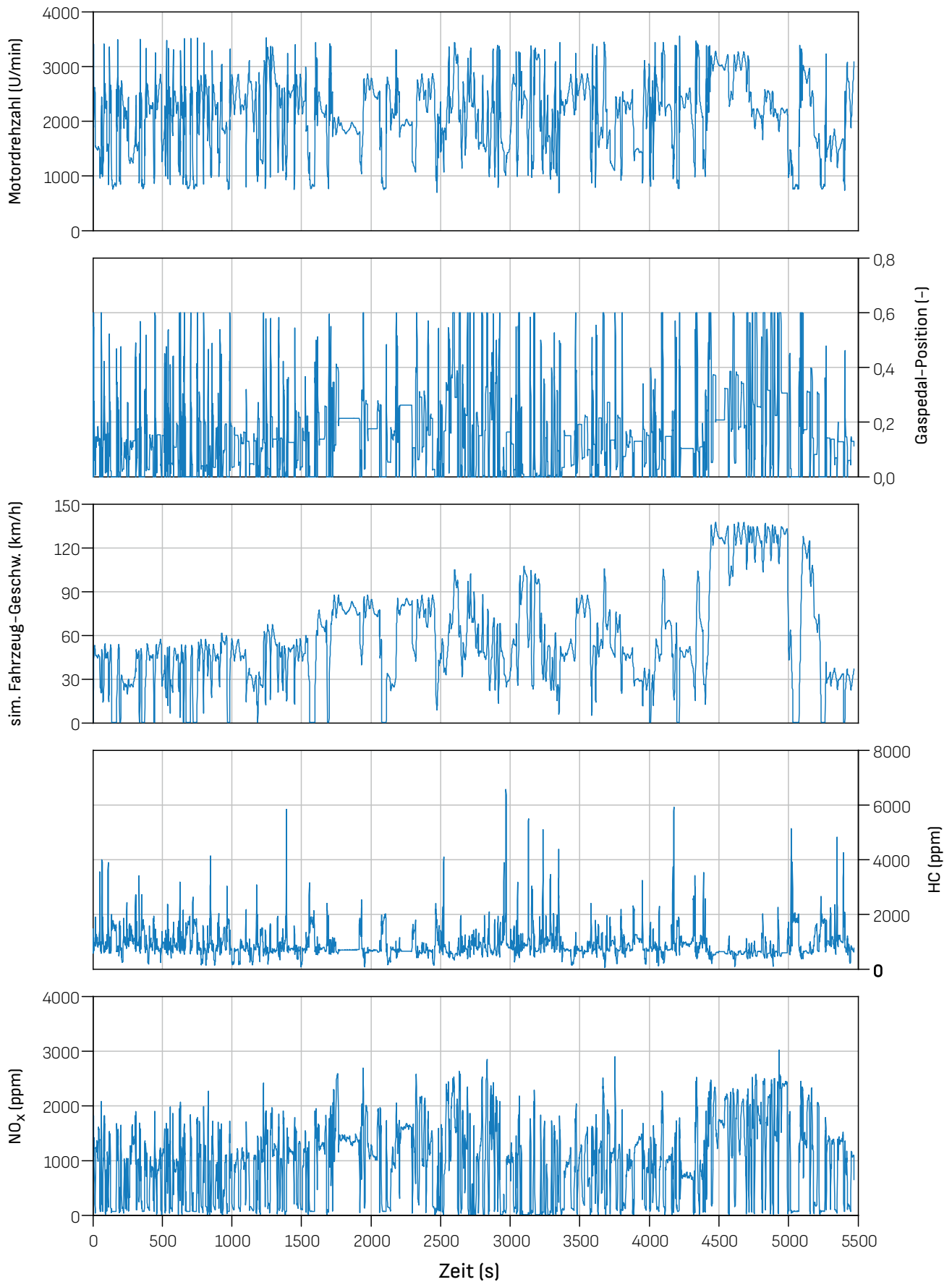


Abb. 2: Beispielhafte experimentelle Daten einer simulierten RDE-Fahrt

**Tabelle 6:** Fahrzeuggeschwindigkeit und Dynamikbereich der verwendeten RDE-Fahrten

	Fahrer-Dynamik	Bereich		
		urban	ländlich	Autobahn
$V_{mean}$ [km/h]	niedriger	35,9–38,4	74,7–75,5	115–119
	mittel	35,2–35,9	74,4–75,4	115–118
	höher	32,7–34,3	74,0–76,3	116–119
$va_{pos,95}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	niedriger	15,7–17,4	19,3–22,4	18,2–20,7
	mittel	18,1–19,9	23,3–31,6	24,6–33,9
	höher	21,6–25,6	26,1–34,4	33,1–36,7

### Eingangsparameter

Wie bereits erwähnt, sind die Ausgangsparameter bei der Modellierung dieser Studie NO<sub>x</sub> und HC jeweils in der Einheit ppm. Zunächst wurden zehn Parameter ausgewählt, die als Input für die Entwicklung der Modelle dienen sollten. Da die lokalen Bedingungen im Zylinder, die vor allem für die Emissionsbildung wichtig sind, nicht bekannt sind, wurden mehrere externe Parameter für den Modellierungsansatz gewählt. Sie sind im Folgenden zusammen mit ihrem Einfluss auf die Verhältnisse im Zylinder aufgeführt:

- *Eingespritzte Kraftstoffmasse* (mg pro Hub): Kraftstoffgemisch, Last und Spitzendruck im Zylinder
- *Drosselklappenstellung* (%), *Einlassventilhub* (mm): Last, Kraftstoffgemisch, Strömung im Zylinder
- *Motordrehzahl* (1/min): Strömung im Zylinder
- *Ladedruck* (mbar): maximaler Druck im Zylinder
- *Ladedruck* (MPa), *Einspritzzeitpunkt* (Grad Kurbelwelle vor oberem Totpunkt): Gemischbildung, Homogenisierung
- *Ansauglufttemperatur* (°C): Klopfverhalten
- *Zündzeitpunkt* (Grad Kurbelwelle v.ZOT): Verbrennungseigenschaften einschließlich Höchstdruck
- *Volumetrischer Wirkungsgrad* (-): zusätzlicher, optionaler Lastparameter

Zunächst wurden diese Parameter statistisch untersucht, um festzustellen, ob überhaupt ein Zusammenhang zwischen den Parametern und den jeweiligen Emissionen besteht. Das Ergebnis lässt sich anhand von Spearman- und Pearson-Parametern bewerten. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante lineare und nicht-lineare Korrelation zwischen Eingangs- und Ausgangsparametern. Dies bestätigt die Tatsache, dass die ausgewählten Eingangsparameter eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung

und Vorhersage der NO<sub>x</sub>- und HC-Emissionen spielen. Grundsätzlich sind die gewählten Eingangsparameter also geeignet.

### Datenvorbereitung

In einem ersten Schritt wurden die Daten aus verschiedenen Messsystemen synchronisiert. Danach wurden 20% der Daten nach dem Zufallsprinzip entnommen, um sie für den Test der entwickelten Modelle zu verwenden. Mit den verbleibenden Daten wurden die Modelle trainiert. Diese Datenproben sollten die gesamten Änderungsbereiche der Eingangsparameter abdecken, um eine ganzheitliche Prüfung der Modelle in allen Bereichen der Änderungsbereiche durchführen zu können. In Abb. 3 ist zu erkennen, dass die Testmuster (blau markiert) eine geeignete Abdeckung für die Änderungsbereiche der Eingangsparameter darstellen.

### Ergebnis der Modellbildung

In der Originalpublikation wird an dieser Stelle detailliert auf statistische Kennwerte zur Modellgüte eingegangen. Das Ergebnis lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Das LSTM ist sehr gut geeignet um die Emissionen abzubilden. Im Falle der HC-Vorhersage hat das LSTM-Modell die besten Ergebnisse.
- Es lässt sich feststellen, dass die entwickelten KNN-Modelle nicht genau genug sind, insbesondere bei der Vorhersage der HC-Emissionen.
- Bei Ottomotoren und transientem Betrieb durch Lastwechsel können hohe HC-Emissionsspitzen auftreten, die auf die Verzögerung der Gemischregelung zurückzuführen sind.
  - Die Vorhersage dieser Spitzenwerte ist mit KNN-Modellen nicht möglich (Abb. 4a).
  - Einen großen Vorteil bietet dagegen das LSTM-Modell, das die Informationen aus der vorangegangenen Zeitreihe nutzen kann.

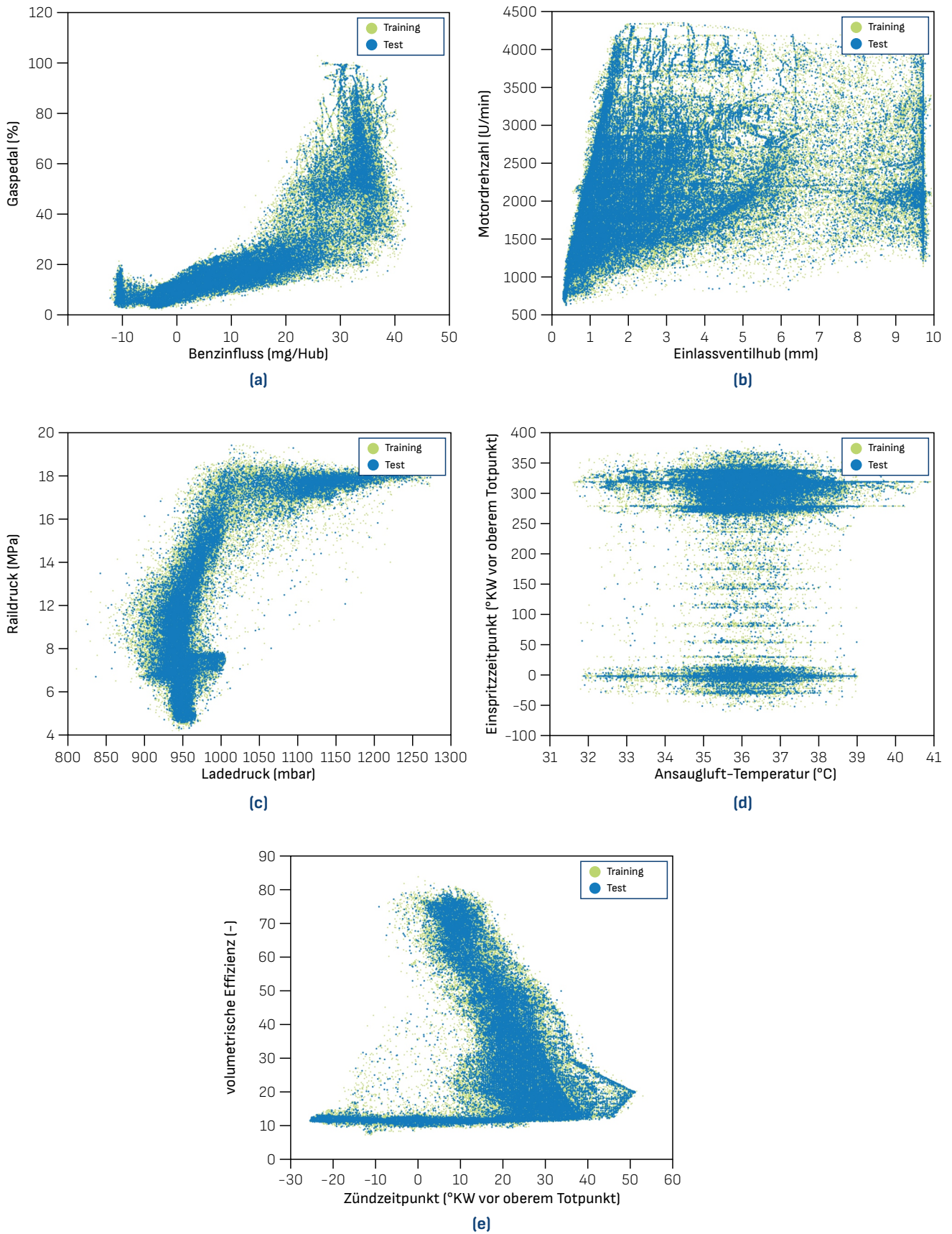
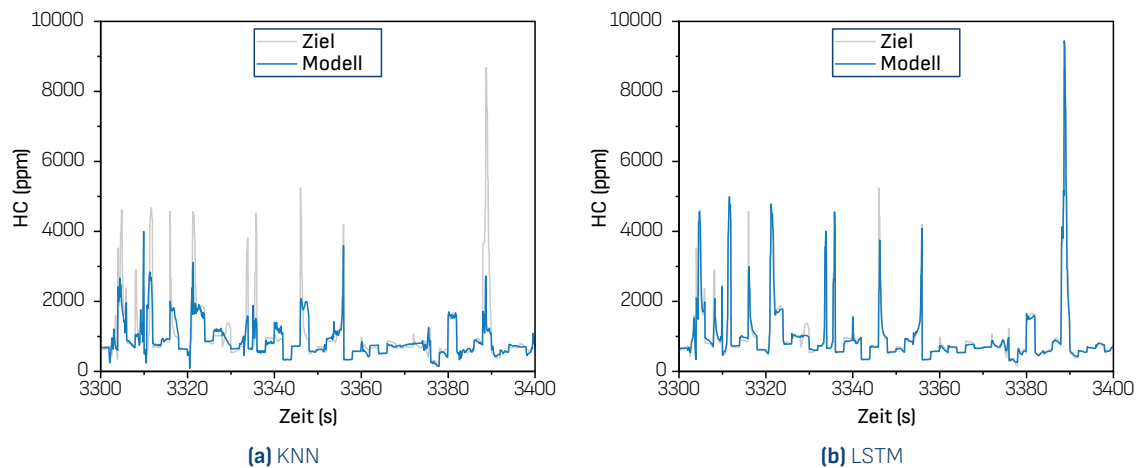


Abb. 3: Darstellung der Trainings- und Testdaten für alle Eingabeparameter





**Abb. 4:** Gemessene (Ziel) und laut Modell vorhergesagte Emissionen mit (a) KNN-Modell; (b) LSTM-Modell

Wie in Abb. 4b beschrieben, wurden die HC-Spitzen von der LSTM-Methode erkannt und korrekt vorhergesagt.

deutung. KNN können verwendet werden, um dem RL-Agenten Echtzeitinformationen zu liefern. RL könnte in verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden, zum Beispiel bei der Optimierung der Leistungsverteilung und vergleichbaren Zwecken. ■

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Modellierung der HC- und NO<sub>x</sub>-Rohemissionen für einen Sechszylinder-Ottomotor wurde mit Methoden des maschinellen Lernens durchgeführt. Nach bestem Wissen der Autoren haben die Modelle eine der höchsten Genauigkeiten unter den bisher entwickelten maschinellen Lernmodellen für die Emissionsvorhersage bei hochtransientem Betrieb. Darüber hinaus hat das KNN-Modell nach den Ergebnissen eine Schwäche bei der Vorhersage von HC.

Der Grund dafür ist die sehr hohe HC-Spitze, die bei einem Ottomotor bei Lastwechseln auftreten kann. In diesem Fall bietet das LSTM-Modell, das Daten aus früheren Zeitschritten verwendet, Vorteile hinsichtlich der Genauigkeit.

Ein wichtiger Vorteil dieser Modelle ist die Bewertung von Abgasnachbehandlungssystemen während der Fahrt auf der Straße. Die Modellierung der Rohemissionen könnte auf dem Prüfstand durchgeführt werden (wie in dieser Studie) und die trainierten Modelle im RDE-Fahrbetrieb eingesetzt werden. Durch den Vergleich der vorhergesagten Rohemissionen aus den entwickelten Modellen mit den gemessenen Auspuffemissionen aus dem PEMS-Messsystem könnte eine aussagekräftige Bewertung der Effizienz von Abgasnachbehandlungssystemen unter realen Fahrbedingungen gewonnen werden.

Darüber hinaus wäre der Einsatz von KNN im modellbasierten Reinforcement Learning (RL) von Be-

## Literaturverweise

Moradi, Mohammad Hossein, Alexander Heinz, Uwe Wagner und Thomas Koch (2022). »Modeling the emissions of a gasoline engine during high-transient operation using machine learning approaches«. In: *International Journal of Engine Research* 23.10, S. 1708–1716. doi: 10.1177/14680874211032381.



Intelligent Urban Transport Systems

# 14.-16. Mai 2024 Messe Karlsruhe

Fachmesse | Konferenz | Netzwerken

Die Mobilität der Zukunft erleben!  
Jetzt Termin der IT-TRANS vormerken



IT-TRANS 2022 | dm-arena



**KAMO**  
KARLSRUHE MOBILITY

WIR  
SIND  
DABEI

**Smarte Mobilität, Fahrplanmanagement, Fahrgastinformationen, Ticket- & Fahrpreismangement, Mobility as a service, Softwareentwicklung, autonomes Fahren, Datenintelligenz, Intelligente Mobilität, Cybersicherheit**

[it-trans.org](http://it-trans.org)

Organisers



messe  
— karlsruhe

[KAMO.INFO]

# Veranstaltungen



Wenn Sie KAMO direkt erleben und kennen lernen wollen, oder sich direkt mit den Expertinnen und Experten vor Ort austauschen wollen, planen Sie doch gern einen Besuch unserer Veranstaltungen ein. Im Folgenden geben wir einen kurzen Überblick über einige Highlights von und mit KAMO in der nächsten Zeit. Alle Veranstaltungen und Termine finden Sie natürlich auch auf unserer Website.

## → IAA MOBILITY

München

5.–8. September 2023

Die größte und wichtigste Mobilitätsveranstaltung der Welt bietet Herstellern, Zulieferern, Tech-Unternehmen, Dienstleistern und Startups vielfältige Möglichkeiten, sich und ihre Leistungen einem breiten internationalen B2B- und B2C-Publikum zu präsentieren. KAMO ist durch mehrere Partner vertreten, unter andere auf dem Fraunhofer-Stand in Halle B1.D11.

<https://www.kamo.one/iaa/>

## → Fachkongress Urbane Güterlogistik und Verkehrsplanung | Last Mile City Lab

Bruchsal

14. September 2023

Erfahren Sie die Zukunft der urbanen Güterlogistik! Im geförderten Efeu-Projekt in Bruchsal wurde eine zukunfts-fähige Lösung für die letzte Meile entwickelt und im Last-MileCityLab Reallabor getestet. Tauchen Sie ein in unsere Innovationen und diskutieren Sie mit Experten aus Mobilität, Logistik und Verkehrsplanung. Seien Sie dabei im InnovationsLab HubWerk01 in Bruchsal!

<https://efeucampus-bruchsal.de/aktuelles/fachkongress-tommorrowcamp/>

## → Women in Mobility Hub Baden: DrinksUp

Freiburg

18:30 Uhr, 8. September 2023

WiM Summit – we do Mobility, als Gastgeberin in ganz Deutschland. Unter diesem Motto lassen wir den WiM Summit gemeinsam mit einem lokalen Netzwerktreffen in Freiburg ausklingen.

<https://www.womeninmobility.org/baden>

## → UITP Training »Bus Planning & Scheduling«

Karlsruhe

19.–21. September 2023

Entdecken Sie die Zukunft der urbanen Mobilität! Besuchen Sie unser 3-tägiges, englischsprachiges Kursprogramm. Lernen Sie strategische Ansätze für erfolgreiche Busplanung und -disposition kennen und profitieren Sie von internationalem Fachwissen und lokaler Expertise. Melden Sie sich jetzt an und gestalten Sie grünere, sicherere und gesündere Städte!

<https://www.uitp.org/trainings/bus-planning-and-scheduling/>



→ **Messeauftritt des Karlsruhe Mobility Lab**  
UITP GPT Summit, Barcelona, Juni 2023



→ **Vortrag von Gabriel Wilkes zu DAKIMO**  
UITP GPT Summit, Barcelona, Juni 2023



→ **NUFAM – Die Nutzfahrzeugmesse**  
Messe Karlsruhe 21.–24. September 2023

Kompakt und zugleich umfassend und vielfältig, bietet die NUFAM einen konzentrierten Überblick über das gesamte Portfolio der Nutzfahrzeugbranche. Ausstellung und Fachprogramm machen die NUFAM zur wertvollen Informations-, Präsentations- und Entscheidungsplattform der gesamten Branche.

<https://www.nufam.de>

→ **Transformation regionale**  
**Automobilwirtschaft**

Karlsruhe & Rastatt September & November 2023

Bei den Automobilstandorten der Republik nimmt die Region um Karlsruhe Rang fünf ein. Bis zu 20.000 Arbeitsplätze stehen vor einer Transformation. Welche Anforderungen ergeben sich für Arbeitgeber, Arbeitnehmer, Interessensverbände und die Politik, um die regionale Transformation erfolgreich zu gestalten? Erwartungen und Herausforderungen sollen in mehreren Veranstaltungen thematisiert und Lösungskonzepte gefunden werden.

4. Business Frühstück, 21. September 2023  
Messe Karlsruhe, Konferenzzentrum

5. Business Frühstück, 11. November 2023  
Reithalle Rastatt

<https://ae-network.de/transformation-automobilwirtschaft>

→ **Vernetzungsevent Fraunhofer-Allianz**  
**Batterien**

Dresden 23.–24. Oktober 2023

Die Fraunhofer-Allianz Batterien, geleitet vom KAMO-Partner Fraunhofer ICT, veranstaltet mit den Fraunhofer-Batterietagen ein branchenspezifisches Vernetzungsevent zum Thema »Schnellladefähigkeit für die Elektromobilität«.

[https://www.batterien.fraunhofer.de/de/Messen\\_Veranstaltungen/Fraunhofer-Batterietage.html](https://www.batterien.fraunhofer.de/de/Messen_Veranstaltungen/Fraunhofer-Batterietage.html)

→ **Future Mobility Award 2023**

für das Start-Up »AICORN« (Copyright: aen/pixelgrün)  
v.l.n.r.: Staatssekretärin Elke Zimmer, Thilo Richter (AICORN), Oberbürgermeister Dr. Frank Mentrup

→ **regioTransformation Lernreisen**  
mehrere Standorte 4. Quartal 2023

Sowohl Lithium als auch grüner Wasserstoff sind die essentiellen Startpunkte der zwei Wertschöpfungsketten Elektromobilität und Brennstoffzelle/Wasserstoff. Europas größtes Lithiumvorkommen befindet sich im Südwesten Deutschlands und könnte mittels Geothermieanlagen aus den Tiefengewässern des Oberrheingrabens gefördert werden.

Der Rheinhafen von Karlsruhe wiederum wäre ein ausgesucht idealer Standort für einen Wasserstoff-Hub.

Um den Innovationsprozess aktiv zu gestalten und zu begleiten, werden Lernreisen zur Transformation von Wissen organisiert. Lernreisen im 4. Quartal 2023 umfassen:

- Wasserstoffinsel Öhringen & KlimaARENA Sinsheim
- Lithium-Förderung im Oberrheingraben
- Wasserstoffproduktion Lhyfe, Bouin bei Nantes – ein Blick auf die deutsch-französischen Aktivitäten

<https://ae-network.de/projekt-regiotransformation>

→ **IT-TRANS – Intl. Konferenz & Fachmesse**  
Karlsruhe 14.–16. Mai 2024

Die IT-TRANS – führende internationale Konferenz und Fachmesse für intelligente Lösungen im öffentlichen Verkehr – bringt Sie auf den neuesten Stand der technologischen Innovationen, die im urbanen Verkehr richtungweisend sind.

<https://www.it-trans.org>

→ **Airbag-Tagung 2024**

Mannheim 25.–27. November 2024

Im November veranstaltet das Fraunhofer ICT das 16. Internationale Symposium und Ausstellung für hochentwickelte Fahrzeugsicherheitssysteme.

[https://www.ict.fraunhofer.de/de/veranstaltungen\\_messen/veranstaltungen/airbag.html](https://www.ict.fraunhofer.de/de/veranstaltungen_messen/veranstaltungen/airbag.html)

→ **Future Mobility Award 2024**

Mit dem Future Mobility Award werden nachhaltige Mobilitätslösungen für den Verkehrssektor ausgezeichnet. Ziel ist es, Start-Up-Unternehmen die Chance zu geben, ihre Ideen und Lösungen sichtbar zu machen. Die Preisverleihung findet im Rahmen der Regionalkonferenz Mobilitätswende statt.

<http://www.future-mobility-award.de>



**KAMO.Magazin**

kamo.one/magazin

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

**ISSN** (Print) 2941-7511

**ISSN** (Online) 2941-7554

© Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.