

2025

MORE

Munich **Mobility Research** Campus

MOBILITÄT DER ZUKUNFT ERFAHRBAR MACHEN

RESILIENT | MULTIMODAL | VERNETZT | NACHHALTIG

www.unibw.de/more

INHALT

ÜBER UNS S. 3

Ziel | Vision | Projektleitung | Ziele und Aufbau des Berichts | Beteiligte Fakultäten, Teilbereiche, Professuren

STATISTIK S. 7

LABORE & DEMONSTRATOREN S. 8

Aus dem Bereich Mobilität & Verkehr | Energie & Antrieb | Vernetzung & Autonomie | Chancen & Auswirkungen

BERICHTE S. 12

Zusammenfassungen der Teilbereiche | Forschungsberichte der wissenschaftlichen Mitarbeitenden

VERÖFFENTLICHUNGEN S. 130

ÜBER UNS

Ziel von MORE ist die ganzheitliche Demonstration einer nachhaltigen und umweltschonenden Mobilität der Zukunft auf dem einzigartigen Modellcampus der Universität der Bundeswehr München. Derzeit sind 18 Professorinnen und Professoren als auch mehr als 60 wissenschaftliche Mitarbeitende aus über 20 Nationen in das dtec.bw-Projekt MORE miteinbezogen.



VISION

MOBILITÄT DER ZUKUNFT ERFAHRBAR MACHEN

Das durch das dtec.bw-geförderte Projekt „MORE“ verwandelt den Campus der Universität der Bundeswehr zu einer Modellstadt für die Mobilität der Zukunft. CO2-neutral, energieeffizient, multimodal, flächeneffizient, autonom und vernetzt.

PROJEKTLEITUNG

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Silja Hoffmann
Projektleitung



Prof. Dr.-Ing. Christian Trapp
Projektleitung bis Juni 2025



ZIELE UND AUFBAU DES BERICHTS

Ziel dieses Berichts ist es, den aktuellen Stand zum Dezember 2025 und damit nach 5 Jahren Projektlaufzeit darzustellen. Aufgebaut ist der Bericht wie folgt:

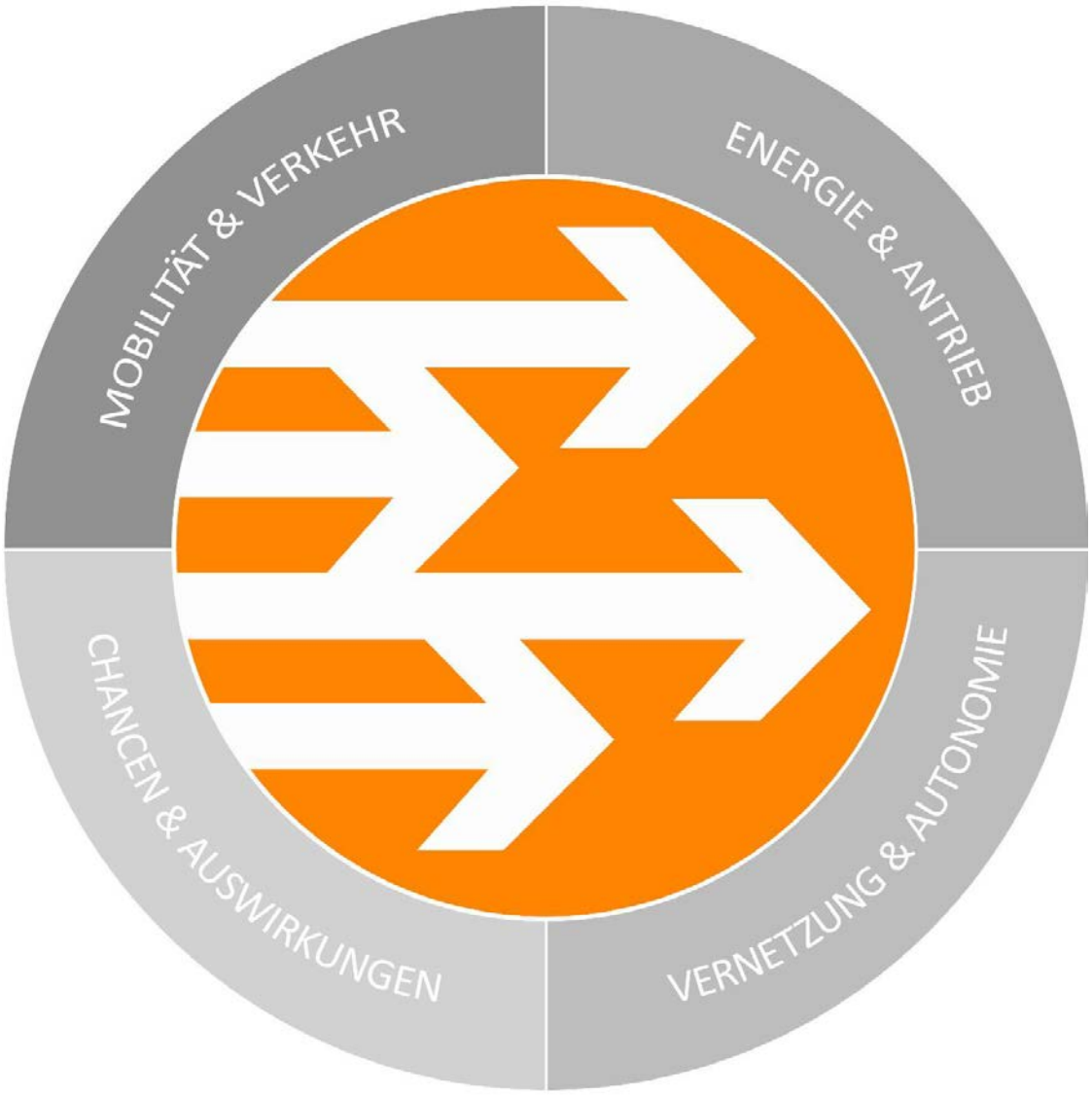
- Statistik
- Zielsetzung und Fortschritt des Forschungsvorhabens
- Veröffentlichungen

Zuerst wird auf die Grundstruktur des Projekts eingegangen. Danach werden die Key-Facts des Projekts aufgezeigt. Daraufhin wird eine Zusammenfassung der Teilbereiche und der beteiligten Professuren gegeben. In einem separaten Bericht werden die Forschungsschwerpunkte der wissenschaftlichen Mitarbeitenden behandelt.

BETEILIGTE FAKULTÄTEN, TEILBEREICHE, PROFESSUREN

Im Projekt MORE sind sechs Fakultäten der Universität der Bundeswehr München beteiligt.





Das Forschungsprojekt untergliedert sich in vier Teilprojekte:

„Mobilität und Verkehr“, „Energie und Antrieb“, „Chancen und Auswirkungen“ sowie „Vernetzung und Autonomie“.
Durch M&V dient der Campus der UniBwM als Reallabor für die „Modellstadt für die Mobilität der Zukunft“ mit innovativer und flächeneffizienter Verkehrsinfrastruktur und nutzerorientierten multimodalen Mobilitätslösungen. Das Team von E&A befasst sich überwiegend mit der Erforschung und Umsetzung der regenerativen Erzeugung und Speicherung CO2-neutraler Energieträger für die Infrastruktur und den Mobilitätsbedarf. C&A beschäftigt sich damit, die Mobilität der Zukunft vorzubereiten und Chancen und Auswirkungen für Bürger aufzuschlüsseln. Bei V&A werden neue Konzepte für das autonome Fahren sowie die Vernetzung von Fahrzeugen (autonom und bemannt) mit Verkehrssensorik und anderen Infrastrukturen erforscht und innovative Lösungen für eine gesamtheitliche Mobilität entwickelt.

MORE Mobilität & Verkehr

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Silja Hoffmann	Intelligente, Multimodale Verkehrssysteme
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Leonhardt	Verkehrsinfrastruktur und Verkehrstechnik
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Anja Huemer	Verkehrspsychologie
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Jacoby	Raumplanung und Mobilität

MORE Energie & Antrieb

Prof. Dr.-Ing. Christian Trapp	Fahrzeugantriebe bis Juni 2025
Prof. Dr. rer. nat. Thomas Adam	Fahrzeugantriebe ab Juli 2025
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Philip Sander	Projektmanagement und Bauwirtschaft
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Weyh	Elektrische Energieerzeugung und -verteilung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling	Elektrische Antriebstechnik und Aktorik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Klein	Numerische Methoden
Univ.- Prof. Dr.-Ing. habil. Lars Zigan	Energiewandlung in der Luft- und Raumfahrttechnik

MORE Vernetzung & Autonomie

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mirko Mählisch	Maschinelle Wahrnehmung für autonomes Fahren
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Matthias Gerdts	Ingenieurmathematik
Prof. Dr.-Ing. Ferdinand Englberger	Embedded Systems
Prof. Dr.-Ing. Vladislav Nenchev	Embedded Systems
Prof. Dr. rer. nat. Antje Neve	Internet of Things

MORE Chancen & Auswirkungen

Prof. Dr. rer. nat. Thomas Adam	Chemie und Umwelttechnik
Univ.-Prof. Dr. rer. pol. Axel Schaffer	Wandel und Nachhaltigkeit

STATISTIK

Das Projekt MORE ist mit 60,4 Mio. € gefördert. Aus dem Projekt sind mehr als 279 Veröffentlichungen bis zum Stichtag 31.12.2025 entstanden. Beteiligt im Projekt sind bei dem wissenschaftlichen Mitarbeitenden 17 % Frauen und 83 % Männer.
17 % der im Projekt eingebundenen Professuren sind mit Professorinnen besetzt.



Das Projekt MORE ist Teil des Forschungszentrums für Mobilität und regenerative Energien, dessen Ziel es ist, Lösungen zu finden, um eine nachhaltige, klima- und umweltschonende Energieversorgung zu entwickeln, inklusive den dazugehörigen Mobilitäts- und Verkehrssystemen.

MORE Munich Mobility Research Campus

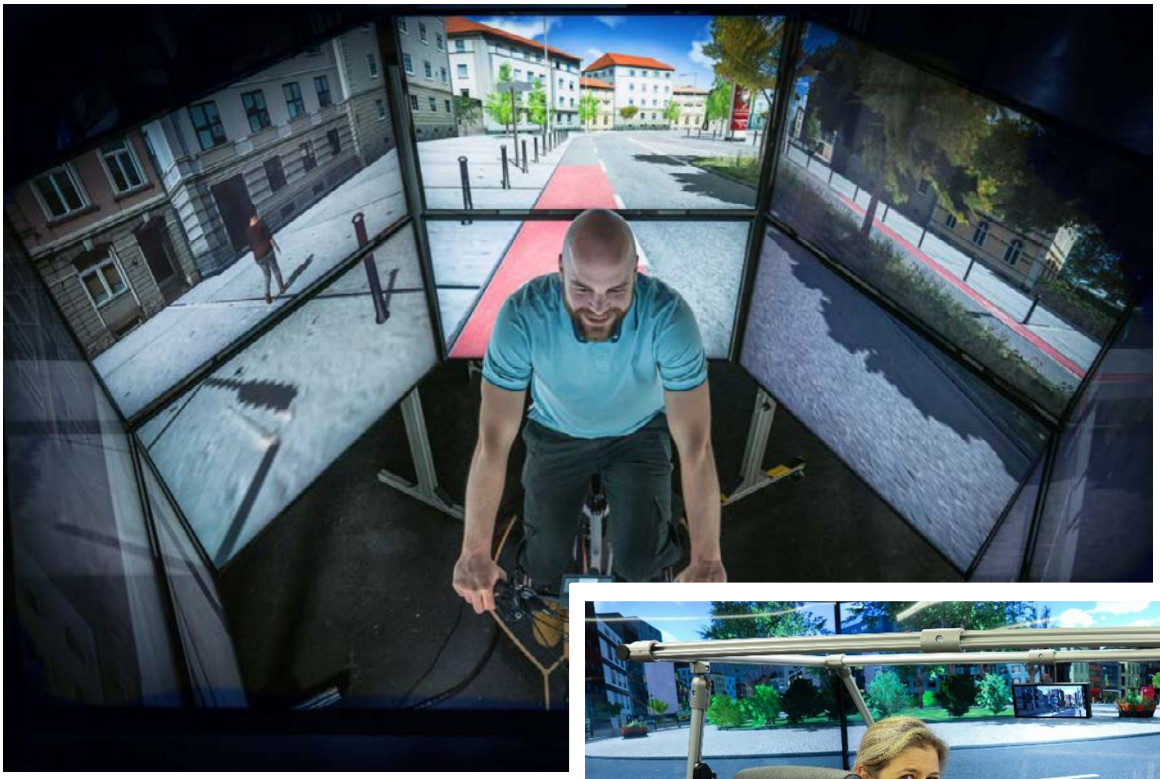
TEIL DES NEUEN

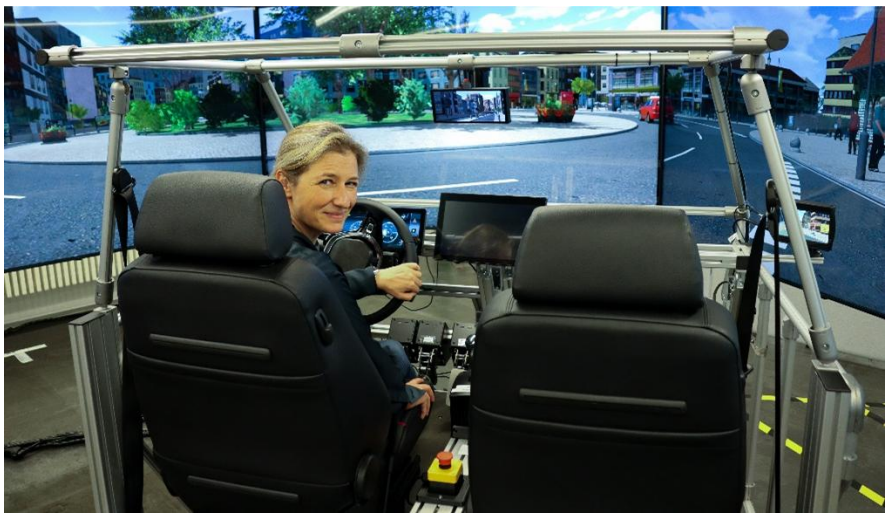
FZ MORE Forschungszentrum Mobilität und regenerative Energien Universität der Bundeswehr München

LABORE & DEMONSTRATOREN

Viele Projekte wurden bereits abgeschlossen, einige sind noch in Bearbeitung.
Einen kleinen Einblick bieten folgende abgeschlossene Projekte.

AUS DEM BEREICH MOBILITÄT & VERKEHR



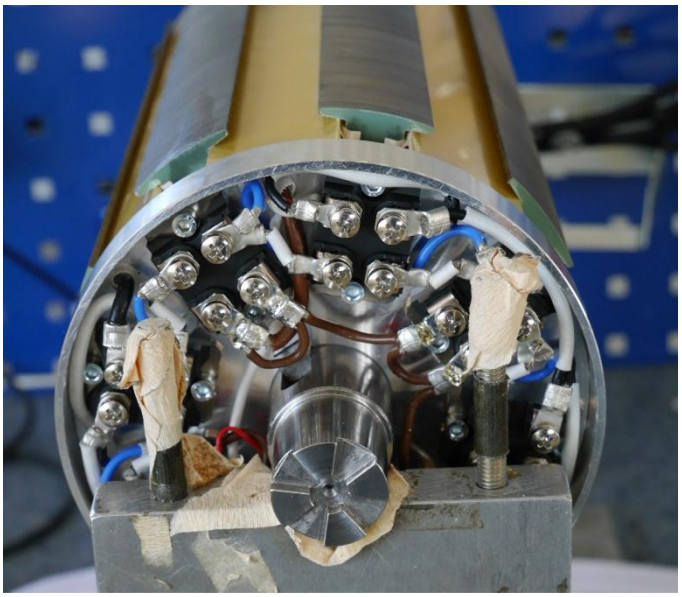


FAHR- UND FAHRRADSIMULATOR

Um das Verhalten von Fahrrad- und Autofahrern besser analysieren zu können, wurden Fahr- und Fahrradsimulatoren, nach neuestem Stand der Technik aufgebaut.
Damit können gefährliche Situationen untersucht werden, ohne dabei die Probanden in Gefahr zu bringen.







5-PHASIGE SELBSTERREGTE SYNCHRONMASCHINE FÜR ELEKTRISCHE ANTRIEBE

Die eMaschine bietet hohe Effizienz und Leistungsdichte, und kann eine PMSM in einem Elektrofahrzeug ersetzen.
Durch Selbst-erregung bietet die Maschine vergleichbare Leistung, jedoch ohne Permanentmagnete oder Seltene Erden.
Außerdem bringt ein 5-Phasen-System erhöhte Fehlertoleranz und verbesserte thermische Ausnutzung.

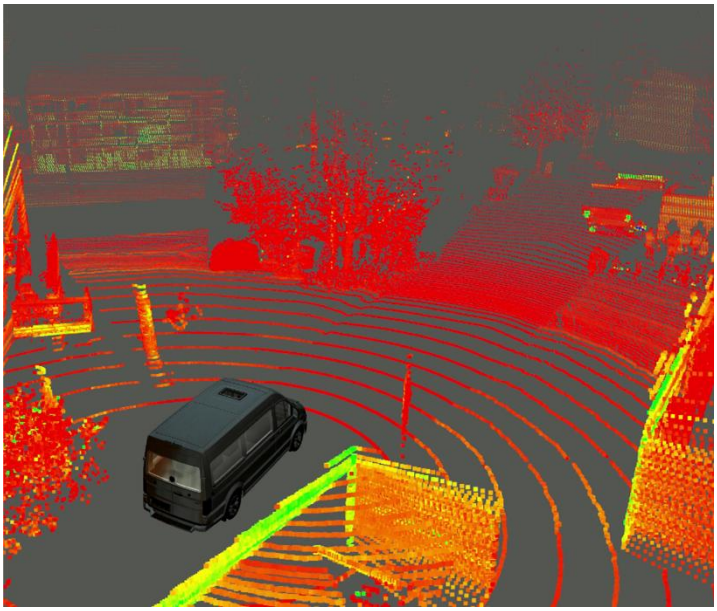
AUS DEM BEREICH VERNETZUNG & AUTONOMIE



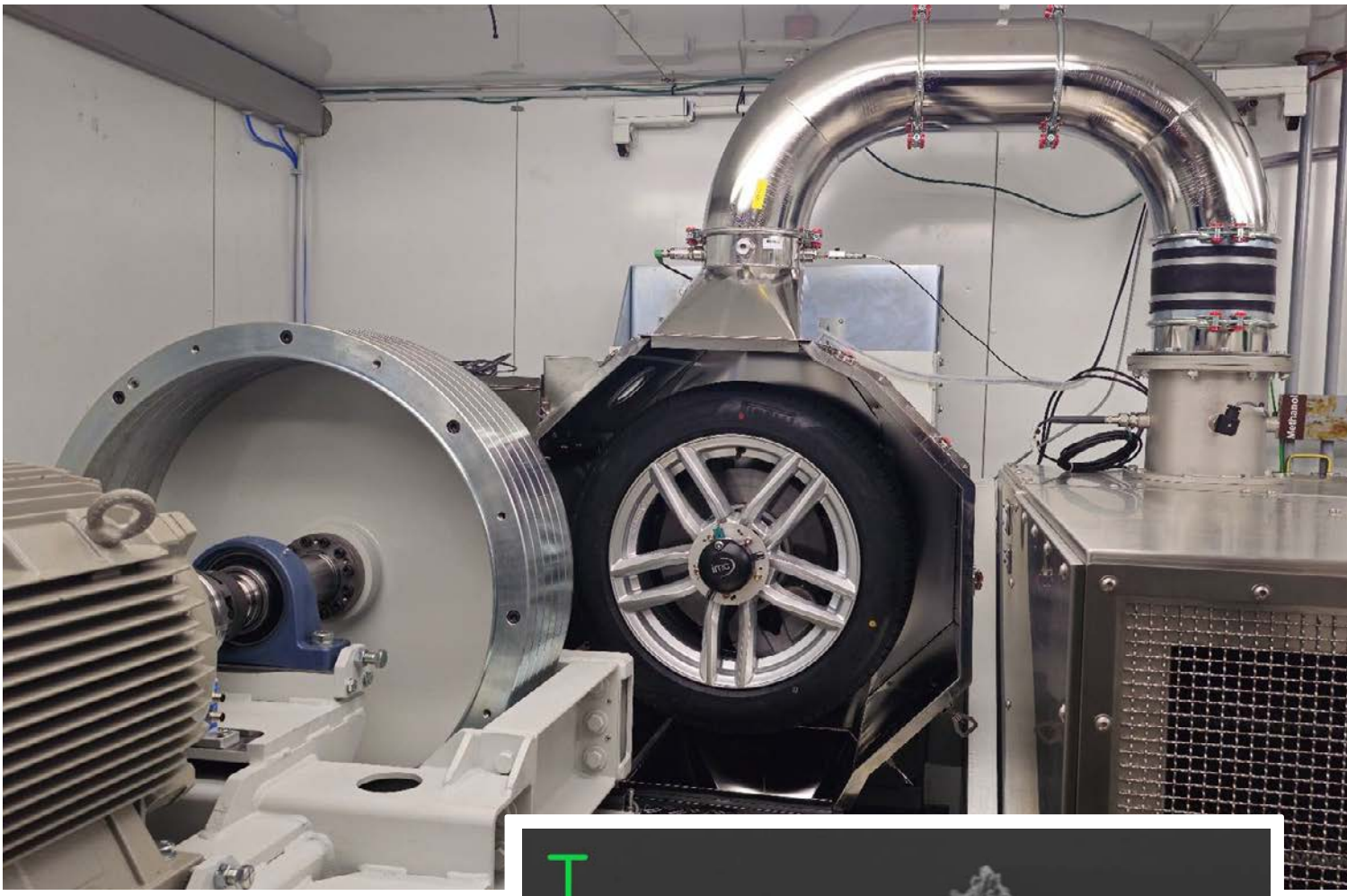


AUTONOMER PERSONEN TRANSPORT - SHUTTLE

Zwei Versuchsfahrzeuge auf Basis von VW e-Craftern werden mit Fenster und entsprechender Bestuhlung zu modularen Personenshuttles aufgebaut. Weiterhin werden die Fahrzeuge mit vielfältiger aktueller Messtechnik bestückt. Die Fahrzeuge werden so weit entwickelt um eine gemischte Personenbeförderung, von manuell bis vollautomatisiertem Fahren, bewerkstelligen zu können. Ein Fahrzeug erhält straßenzulassungsfähiges Drive-by-Wire-System, das zweite Fahrzeug dient primär als Sensorträger.

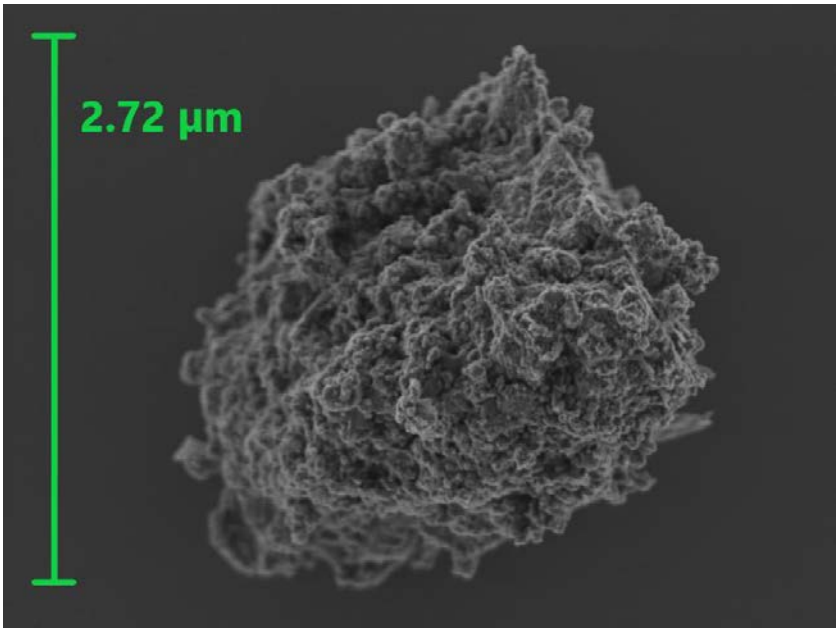


AUS DEM BEREICH CHANCEN & AUSWIRKUNGEN



LABOR FÜR BREMSEN- UND REIFENPARTIKEL-EMISSIONEN

Durch das neu in Betrieb genommene Reifenmodul können erstmalig bei einem EURO-7-konformen Prüfstand Bremsen- und Reifenabrieb gleichzeitig erfasst werden.



BERICHTE

ZUSAMMENFASSUNGEN DER TEILBEREICHE

Mobilität & Verkehr | Energie & Antrieb | Vernetzung & Autonomie | Chancen & Auswirkungen

MOBILITÄT & VERKEHR – Prof. Dr.-Ing. Silja Hoffmann

Der Teilbereich Mobilität und Verkehr wird durch die folgenden Professuren abgebildet:

- Intelligente, Multimodale Verkehrssysteme– Prof. Silja Hoffmann
- Verkehrsinfrastruktur und Verkehrstechnik – Prof. Axel Leonhardt
- Verkehrspsychologie – Prof. Anja Huemer
- Raumplanung und Mobilität – Prof. Christian Jacoby

Im Zusammenspiel von Analyse, Entwicklung, Demonstration und Evaluation werden im Projekt Mobilität, Verkehr und Flächennutzung der Zukunft erforscht sowie innovative Lösungen auf dem Campus der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) erprobt. Im Rahmen des Projekts wurde der Campus zu einem Reallabor für Mobilität, Verkehr und Infrastruktur der Zukunft weiterentwickelt. Gleichzeitig dient er durch den Einsatz neuer Technologien zur Datenerfassung und Demonstration als Erprobungsraum für grundlegende verkehrswissenschaftliche Forschung.
Ziel war es, den Campus als Reallabor und „Modellstadt für die Mobilität der Zukunft“ zu etablieren. Hierfür wurden innovative und flächeneffiziente Verkehrsinfrastrukturen sowie nutzerorientierte multimodale Mobilitätslösungen entwickelt, implementiert und wissenschaftlich begleitet. Studierende, Mitarbeitende und weitere Campusnutzende können diese innovativen Mobilitätsangebote unmittelbar erleben, erproben und bewerten.
Zu den zentralen Demonstratoren und Forschungsschwerpunkten des Teilprojekts Mobilität und Verkehr zählen:

- MORE Sharing – Aufbau und Betrieb eines Mikromobilitäts-Sharing-Systems auf dem Campus,
- Vernetzter Fahrradsimulator zur Untersuchung des Verhaltens von Radfahrenden in unterschiedlichen Verkehrssituationen,
- Vernetzter Fahrsimulator zur Erforschung des Fahrverhaltens und der Interaktion mit zukünftigen Mobilitätssystemen,
- Verkehrsdatenerfassung mittels innovativer Sensorik und digitaler Erfassungssysteme,
- Verkehrssimulation zur Analyse und Bewertung von Verkehrsabläufen sowie zukünftigen Mobilitätsszenarien,
- On-Demand-Mobilität zur Erforschung flexibler und bedarfsgesteuerter Mobilitätsangebote.

Im Forschungsbereich Mobilität & Verkehr (M&V) sind derzeit vier Professuren mit den zugehörigen, durch MORE finanzierten wissenschaftlichen Mitarbeitenden beteiligt. Diese werden fachlich und technisch durch weitere wissenschaftliche sowie technische Mitarbeitende des Instituts für Verkehrswesen und Raumplanung unterstützt.
Die Forschungsschwerpunkte von M&V liegen in den Bereichen multimodale Verkehrssysteme, Verkehrstechnik, Raumplanung und Verkehrspsychologie. Die Professur für Intelligente Multimodale Verkehrssysteme (IMV – BAU 7.1) forscht zu den Themen Analyse des Mobilitätsverhaltens, Erfassung und Modellierung von Verkehrs- und Fahrverhalten, Betrieb von On-Demand-Verkehren sowie Konzeption, Aufbau und Analyse eines Mikromobilitäts-Sharing-Systems. Die Professur für Verkehrsinfrastruktur und Verkehrstechnik (VIVT – BAU 7.2) bearbeitet Forschungsfragen in den Bereichen Verkehrssteuerung, Quartierslogistik und Verkehrsanalyse. Die Professur für Raumplanung und Mobilität (RuM – BAU 7.3) fokussiert die Themen Verkehrsflächenentwicklung, Elektromobilität und erneuerbare Energien sowie urbane Räume und Mobilitätsplanung. Die Professur für Verkehrspsychologie (VPsy – BAU 7.4) untersucht die experimentelle Gestaltung von Verkehrsinfrastrukturen sowie Bedürfnisse, Einstellungen und Verhaltensweisen von Nutzenden.

Im Jahr 2025 wurden die Forschungsarbeiten aller wissenschaftlichen Mitarbeitenden weiter konkretisiert. Die zugrunde liegenden Konzepte sind ausgearbeitet und befinden sich vollständig in der Umsetzungs- und Analysephase. Die Demonstratoren und Labore wurden vollständig aufgebaut und werden erfolgreich für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten genutzt. Die Projektarbeit hat bereits zu zahlreichen wissenschaftlichen Ergebnissen sowie zu Veröffentlichungen auf nationalen und internationalen Konferenzen geführt.

ENERGIE & ANTRIEB – Prof. Dr. rer. nat. Thomas W. Adam

Einleitung

Im Jahr 2025 wurden im Bereich Energie und Antrieb bedeutende Fortschritte in den Bereichen Fahrzeugantriebe, Smart Battery, elektrische Antriebstechnik, thermodynamische Methoden, Energiewandlung und Energiesysteme erzielt. Der Fokus lag auf nachhaltigen, effizienten und emissionsarmen Technologien zur Energieumwandlung und Speicherung. Neben der Entwicklung neuer elektrischer Antriebssysteme standen auch die Optimierung von Verbrennungsprozessen und die Integration erneuerbarer Energien im Mittelpunkt. Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung eines Demonstratorfahrzeugs mit seriellem Hybridantrieb.

Fortschritte im Bereich Fahrzeugantriebe

Ein Schwerpunkt der Forschung war die Entwicklung eines Demonstratorfahrzeugs mit seriellem Hybridantrieb. Durch prädiktive Betriebsstrategien konnte die elektrische Reichweite erhöht und der Kraftstoffverbrauch reduziert werden. Innovative Energiemanagementsysteme ermöglichen eine optimale Nutzung der verfügbaren Energiequellen und tragen zur Verringerung von CO_2-Emissionen im realen Fahrbetrieb bei. Parallel wurden neue Verbrennungsverfahren wie die reaktiv gesteuerte Kompressionszündung (RCCI) und die Vorkammerverbrennung untersucht. Experimentelle Untersuchungen und Modellierungen führten zu einer Reduzierung von Stickoxid- und Partikelemissionen sowie zu einer verbesserten Effizienz im Teillastbereich. Zusätzlich wurden intelligente Energiemanagementstrategien entwickelt, die erneuerbare Energie aus Photovoltaik, Windkraft in Wasserstoff und Batterien speichern und mit Hilfe von Simulationen prädektive Betriebsstrategien integrieren.

Smart Battery und elektrische Energiesysteme

Ein zentraler Forschungsbereich war die Entwicklung der Smart Battery als modulare Batteriesystemtechnologie für Elektrofahrzeuge und stationäre Energiespeicher. Durch die Integration von Steuerungselektronik auf Zellniveau konnte die Flexibilität und Effizienz der Batterienutzung gesteigert werden. Im Demonstratorfahrzeug mit seriellem Hybridantrieb wurde die Smart Battery als zentrale Energiespeicher eingesetzt und ermöglichte eine bedarfsgerechte Leistungsbereitstellung. Die hohe bidirektionale Ladefähigkeit eröffnet zudem neue Möglichkeiten zur Integration von Fahrzeugen in intelligente Energienetze. Mithilfe künstlicher Intelligenz wurden Energiemanagementstrategien entwickelt, um Ladeprozesse, Rekuperation und Energieflüsse innerhalb des Fahrzeugs effizient zu steuern.

Entwicklung neuer elektrischer Antriebstechnologien

Im Bereich der elektrischen Antriebstechnik wurden wesentliche Fortschritte bei der Entwicklung einer neuartigen fünfphasigen Synchronmaschine erzielt. Durch die Nutzung magnetischer Oberwellen zur Rotorerregung konnte eine höhere Leistungsdichte bei kompakter Bauweise erreicht werden. Erste Prototypentests bestätigten Verbesserungen hinsichtlich Energieeffizienz und Leistungsfähigkeit. Die selbsterregte Synchronmaschine (SESM) bietet Vorteile wie ein hohes Anfahrmoment ohne Permanentmagnete, hohe Wirkungsgrade im Betrieb, einfache Feldschwächung bei hohen Geschwindigkeiten sowie reduzierte Systemkosten. Ergänzend wurde ein modulares feldorientiertes Regelungskonzept entwickelt, das eine präzise Drehmomentregelung und eine optimale Nutzung der Freiheitsgrade fünfphasiger Maschinen ermöglicht.

Thermodynamik und numerische Methoden

Im Rahmen von Thermodynamik und numerischer Methoden wurden simulationsgestützte Untersuchungen zur Optimierung moderner Verbrennungsverfahren durchgeführt. High-Fidelity-Simulationen ermöglichten die Analyse von RCCI-, Vorkammer- und Wassereinspritzkonzepten. Zusätzlich wurden datengetriebene Methoden und künstliche neuronale Netze eingesetzt, um Verbrennungsprozesse genauer vorherzusagen und neue Ansätze zur Emissionsreduzierung zu identifizieren. Darüber hinaus wurde eine neue Simulationsmethode für Emulsionsstrahlen entwickelt, die realistische Tropfenverteilungen erzeugen kann und als Grundlage für weiterführende Untersuchungen dient.

Energiewandlung und Luft- und Raumfahrttechnik

Im dtec.bw MORE II Teilprojekt 2.25 wurde die Gemischbildung bei Wasserstoffeinspritzung mit optischer Messtechnik untersucht. Hierfür wurde ein optisch zugänglicher Prüfstand weiterentwickelt, der motorische Bedingungen bis 900 K und 4 MPa simulieren kann. Ein neuer Injektorflansch sowie eine Dosiereinheit wurden konstruiert und erste Versuche zur Validierung des Prüfstands durchgeführt. Die optische Messtechnik für geplante Schlierenmessungen befindet sich derzeit im Aufbau.

Herausforderungen und zukünftige Perspektiven

Trotz der Fortschritte bestehen weiterhin Herausforderungen durch Lieferengpässe, Anpassungen der Prüfstandsinfrastruktur und zukünftige Anforderungen wie die EU7-Abgasnorm. Zukünftig liegt ein Schwerpunkt auf der Integration künstlicher Intelligenz in Hybrid- und Brennstoffzellensysteme sowie der Weiterentwicklung der Smart Battery zu skalierbaren Multilevel-Systemen. Die Forschungsergebnisse aus 2025 zeigen, dass die Kombination aus Batterietechnologien, elektrischen Antrieben und optimierten thermodynamischen Konzepten entscheidend für die Entwicklung nachhaltiger Mobilitäts- und Energiesysteme ist.

VERNETZUNG & AUTONOMIE – Dr.-Ing. Thorsten Lüttel

Der Teilbereich Vernetzung und Autonomie wird durch folgende Professuren abgebildet:

- Maschinelle Wahrnehmung für autonomes Fahren – Prof. Mirko Mählisch
- Ingenieurmathematik – Prof. Matthias Gerdts
- Embedded Systems und Digitale Signalverarbeitung – Prof. Ferdinand Englberger
- Embedded Systems – Prof. Vladislav Nenchev
- Internet of Things – Prof. Antje Neve

Im Forschungsfeld Vernetzung & Autonomie des dtec.bw-Projekts MORE werden Konzepte für das autonome bzw. automatisierten Fahren erforscht. Fünf Professuren mit den durch MORE finanzierten wissenschaftlichen Mitarbeitenden arbeiteten gemeinsam an innovativen Lösungen für eine sichere, nachhaltige und ganzheitliche Mobilität. Dieser Bereich wird von Dr.-Ing. Thorsten Lüttel geleitet.

Für die Forschungsarbeiten stehen neben den institutseigenen Versuchsfahrzeugen MuCAR-3 bis MuCAR-5 und einem e-Golf mehrere im Projekt aufgebaute Demonstratorfahrzeuge für den automatisierten Personen- und Gütertransport zur Verfügung. Hierzu zählen ein StreetScooter Work sowie zwei VW e-Crafter, die mit Sensorik zur Umfeldwahrnehmung, Rechnerplattformen zur Echtzeitverarbeitung, Car2X-Kommunikation und Drive-by-Wire-Systemen ausgestattet wurden.
Die Forschungsschwerpunkte im Bereich Autonomie umfassen die Entwicklung von Verfahren zur Umfelderfassung und Objekterkennung, präziser sensorbasierter Lokalisierung sowie kooperativer Wahrnehmung durch die Fusion von Fahrzeug-, Infrastruktur- und Car2X-Daten. Ergänzend wurden Methoden zur Trajektorienplanung und Fahrzeugregelung unter Unsicherheiten sowie Nahfeld-Sicherheitssysteme für autonome Fahrzeuge entwickelt. Zur Validierung der Verfahren dient unter anderem ein hochgenauer digitaler Zwilling des Campus der Universität der Bundeswehr München.
Die Professur für Internet of Things (ETTI2, Prof. Dr. rer. nat. Antje Neve) verantwortet die Forschung im Bereich Vernetzung und Smart Devices. Im Fokus stehen der Aufbau einer Cloud-Infrastruktur zur Speicherung und Verarbeitung von Mobilitäts- und Energiedaten, die Entwicklung digitaler Zwillinge sowie Methoden zur Aggregation, Visualisierung und datengetriebenen Wissensgenerierung. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei Batterie- und Batteriemanagementdaten.
Nachdem die wesentlichen Komponenten der Forschungsinfrastruktur bereits in der ersten Projektphase aufgebaut wurden, lag der Schwerpunkt im Berichtsjahr auf der wissenschaftlichen Weiterentwicklung und Anwendung der Systeme. Die Ergebnisse wurden in zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht.

CHANCEN & AUSWIRKUNGEN – Prof. Dr. rer. nat. Thomas W. Adam

Die Aufgabe des Forschungsbereiches Chancen und Auswirkungen ist die Bewertung moderner Mobilitätskonzepte bezüglich ihrer Auswirkungen auf Umwelt, Klima und der menschlichen Gesundheit. Für diese gesamtheitliche Betrachtung arbeiteten unterschiedliche Fachrichtungen aus den Bereichen Wirtschaftswissenschaften, Ingenieurwissenschaften und Naturwissenschaften eng und interdisziplinär miteinander zusammen. Dieser intensive Austausch erfolgte auf unterschiedlichen Ebenen, d.h. innerhalb des Forschungsbereiches Chancen und Auswirkungen, zwischen den vier MORE-Forschungsbereichen sowie zwischen externen nationalen und internationalen Partnern und Forschungsprojekten. Viele dieser Kooperationen wurden im Rahmen von MORE neu begonnen, einige existierten bereits, profitierten aber gleichermaßen durch die neue Partnerschaft, einem erweiterten Netzwerk und der Nutzung von Synergien und MORE Infrastrukturen.

Das Forschungsinteresse der Professur Wandel und Nachhaltigkeit (Prof. Schaffer) richtete sich auf drei Bereiche: i. Regionale Determinanten des Markthochlaufs von Elektrofahrzeugen (BEV), ii. Regionalisierung des Bewertungstools ASTRA iii. Simulation des Verlaufs der Bremsemissionen der Pkw-Flotte bis 2050.

i. Regionale Determinanten des Markthochlaufs von Elektrofahrzeugen. Basierend auf ökonometrischen Analysen werden auf Ebene der 401 deutschen Landkreise und kreisfreien Städte attitudinale, sozio-strukturelle und kontextuelle Treiber der Diffusion von Elektrofahrzeugen geschätzt. Dabei wird zwischen gewerblich und privat angemeldeten BEV unterschieden. Bezogen auf die private Flotte bestätigen die Befunde, die in der Literatur vielfach erwähnte hohe Bedeutung der Haushaltseinkommen, des Bildungsniveaus sowie eines (möglichst einfachen) Zugangs zu privaten Lademöglichkeiten. Für die kommerzielle Flotte scheinen diese Faktoren weniger relevant zu sein. Hier spielen die kontextuellen Faktoren, wie die öffentliche Ladeinfrastruktur, die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen sowie Wetterbedingungen eine größere Rolle.

ii. Regionalisierung des Bewertungstools ASTRA. Gemeinsam mit dem Projektpartner M-Five wird das Integrierte Assessment Modell ASTRA regionalisiert. Hierdurch sollen Simulationen nicht mehr nur für den gesamtdeutschen Markt, sondern für einzelne Kreise möglich sein. Dies spielt gerade vor dem Hintergrund lokaler Emissionen eine wichtige Rolle.
iii. Simulation des Verlaufs der Bremsemissionen der Pkw-Flotte bis 2050. Die Simulation der Bremsemissionen untergliedert sich in drei Schritte: Im ersten Schritt erfolgt die unter ii. beschriebene Regionalisierung des ASTRA Modells, um die Flotten sowie die Verkehrsleistung auf regionaler Ebene simulieren zu können. Parallel dazu erfolgt (in Kooperation mit dem Lehrstuhl von Prof. Adam) die Ermittlung spezifischer Bremsstaubemissionen. Im letzten Schritt (2026) ermöglichen die Vorarbeiten die Simulation des Verlaufs von Bremsstaubemissionen bis 2050. Dabei werden neben einem Referenzszenario weitere Szenarien (wie z.B. stärkere Förderung von BEV) durchgespielt.

Das Institut für Chemie und Umwelttechnik (Prof. Adam) befasst sich dabei mit der chemischen und physikalischen Untersuchung von Aerosolen. Schwerpunkt bildet die Charakterisierung von Verkehrsabgasen durch Straßen-, Flug- und Schiffsverkehr sowie die Erforschung ihrer Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit. Letzteres erfolgt in enger Zusammenarbeit mit langjährigen Kooperationspartnern, wie dem Helmholtz Zentrum München (HMGU). Entscheidend für die Arbeit des Instituts ist, dass die erzielten Forschungsergebnisse direkt in politische Entscheidungen einfließen.

Im Berichtszeitraum beschäftigte sich das Institut v.a. mit der Charakterisierung verkehrsbedingter Emissionen aus Nichtverbrennungsprozessen d.h. Brems- und Reifenabrieb. In enger Anlehnung an PMP, welche in den letzten Jahren eine gesetzliche Vorschrift zur Reglementierung von Bremsstaub erarbeitete (Global Technical Regulation GTR24), und Industriepartnern entwickelten die Institute MB 5.2 und MB 6 gemeinschaftlich den weltweit ersten Prüfstand, welcher in der Lage ist simultan Bremsstaub und Reifenabrieb unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Ein Hauptaugenmerk des Instituts lag dabei nach der erfolgreichen Inbetriebnahme in der umfassenden chemischen Charakterisierung des Bremsen- und Reifenabriebs und der Identifizierung von für den Menschen und der Umwelt gefährlichen Stoffe. Diese werden am Prüfstand versucht unter kontrollierten Bedingungen zu identifizieren und umfassend zu charakterisieren (Emission). Im Nachgang wird in Feldversuchen versucht die Gefahrstoffe in der Umgebungsluft nachzuweisen (Immission).

BERICHTE

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

MOBILITÄT & VERKEHR S. 21

Prof. Dr.-Ing. Silja Hoffmann | Prof. Dr.-Ing. Axel Leonhardt | Prof. Dr. rer. nat. Anja Katharina Huemer | Prof. Dr.-Ing. Christian Jacoby

ENERGIE & ANTRIEB S. 47

Prof. Dr.-Ing. Christian Trapp | Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling | Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Klein | Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Weyh | Prof. Dr.-Ing. habil. Lars Zigan

VERNETZUNG & AUTONOMIE S. 92

Dr.-Ing. Thorsten Lüttel | Prof. Dr. rer. nat. Matthias Gerdts | Prof. Dr.-Ing. Ferdinand Englberger | Prof. Dr.-Ing. Mirko Mählisch | Prof. Dr.-Ing. Vladislav Nenchev | Prof. Dr. rer. nat. Antje Neve

CHANCEN & AUSWIRKUNGEN S. 121

Prof. Dr. rer. nat. Thomas W. Adam | Prof. Dr. rer. pol. Axel Schaffer

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

MOBILITÄT & VERKEHR

Prof. Dr.-Ing. Silja Hoffmann

On-Demand Mobility

M.Sc. Oytun Arslan

I. Research Focus

In the first phase of the MORE project, the on-demand shuttle system was developed specifically for the university campus using the microscopic traffic simulation software Vissim [1-3]. One of the remaining research questions following this phase was whether the concepts and models designed for the campus could be transferred to other areas, such as urban environments.

The objective of this work package in the current project phase is therefore to apply the same methodologies in an urban context. As part of the project, the simulation model was extended to include the surrounding urban areas of Unterbiberg and Neubiberg (both part of the Gemeinde Neubiberg), incorporating the key public transport hub Neuperlach Süd.

II. Methodology

With the current extensions to the model, the street network now spans from the Campeon Campus in the west to the Gymnasium Neubiberg in the east and Neuperlach Süd in the north. Within this area, three public transport transfer points have been integrated, allowing passengers to interchange between on-demand shuttles and public transport services:

- S-Bahn Stop Fasanenpark
- S-Bahn Stop Neubiberg
- U-Bahn & S-Bahn Stop Neuperlach Süd

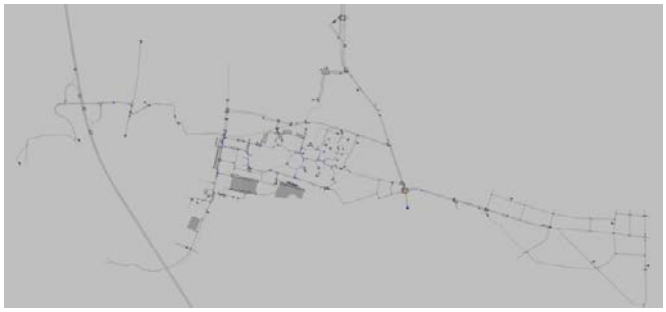


Figure 1: Bird-eye view of the microscopic simulation model in Vissim.

In addition to these three transfer points, 13 further shuttle stops were created to facilitate the boarding and alighting of on-demand passengers. As a result, the network now comprises a total of 16 shuttle stops. On-demand trips occur between pairs of these stops, representing a travel request from one stop to another.

Within the defined network, road sections are subject to various speed limitations, such as 70, 50, 30, 20 km/h, or are designated as shared spaces with even lower speed restrictions. To account for these differences, all road sections were analyzed in advance and appropriately marked with speed limit signs in the simulation model. This approach ensures a more realistic representation of traffic flow for all road users, including the on-demand shuttles.

One key difference between the current model and the previous campus model is the implementation of traffic signals. As there are no signalized intersections within the campus, traffic signal objects were not used in the earlier simulation. However, the extended urban network includes several signalized intersections. In total, 15 signalizations were implemented in the model, 8 for signalized intersections and 7 for pedestrian crossings with actuation (Fußgänger-schutzanlagen). The corresponding signal programs were obtained from the responsible municipalities during the project phase.

For simulation of transport modes other than the on-demand shuttles, traffic input volumes and turning ratios at intersections are essential. As the municipalities could not provide the required traffic data, alternative sources were explored. A traffic count was conducted by students for the intersection at the main gate of the university campus in Unterbiberg. In addition, TomTom offers relevant historical data for many intersections [4]. It is now planned to purchase a software license to access TomTom's junction analytics data.

The algorithm developed during the first project phase was further enhanced with several improvements. Initially, the previous algorithm used distance as the basis for shortest path calculations and routing. This approach was reasonable in the campus context, where shuttles operated at a constant speed of 15 km/h and no signalized intersections were present to introduce delays.

In the current implementation, however, shuttles operate at the same free-flow speeds as other transport modes. Since different road segments have varying speed limits, each segment's distance was converted into travel time by taking its corresponding speed limit into account. Additionally, signalized intersections introduce further delays due to red phases and potential queuing. To reflect this more realistically, the travel time of each road segment (referred to as "edges" in Vissim) was individually calculated and used in the updated shortest path algorithm. Dijkstra's algorithm continues to be applied to search for shortest paths, but edge weights now represent travel time instead of distance.

The matching algorithm used in this study is the batch assignment algorithm, which was developed during the first project phase. This assignment algorithm is based on the approach proposed by Alonso-Mora et al. (2017) [5]. The core idea of this method is to build group of requests ("request-sets") that are assignable to individual vehicles. This is done by starting from single requests, then gradually building upon them by incrementally adding another request to the request-set each time. At every step, the minimum cost of the vehicle/request-set combination is calculated. At the end of this process, a list of vehicle/request-set combinations with their

associated costs is obtained. Subsequently, an integer linear programming (ILP) model is applied to ensure that each vehicle is assigned to at most one request-set, and that each request appears in at most one assigned request-set. Further details of the implementation can be found in the doctoral thesis that was written within the scope of the first phase of the MORE project [6].

The matching algorithm was enhanced to accommodate group bookings. Previously, the algorithm assumed that each request arriving in the system consisted of a single passenger. However, in practice, bookings may involve multiple passengers, such as kids going to school together, or a couple wishing to travel to the nearest subway station. For these cases, the updated algorithm now considers the number of passengers associated with each request. This will be taken into account for both the shuttle capacity constraints and the cost calculations used to determine the optimal match. For instance, the waiting time cost of a request involving two passengers is twice as much as that of a single-passenger request in the same case. The analyses at the end will be then conducted on a passenger basis rather than request basis.

III. Next Steps in 2026

In the next steps of the work package, the traffic inputs and turning ratios at intersections that are missing will be completed. The simulation will then be tested and calibrated through multiple runs using these inputs to ensure realistic modeling.

Subsequently, a request pool will be generated to represent the travel demand for the on-demand shuttles. This request pool will reflect not only the travel needs of residents within the modelled neighborhoods, but also those of individuals commuting to workplaces such as the university, schools, or major employers like the Campeon campus. The request pool will involve group bookings as well.

An additional enhancement is planned for the implementation of latest arrivals for certain requests, particularly in cases where passengers transfer from an on-demand shuttle to a public transport service. For instance, passengers aiming to catch a specific suburban train cannot afford to arrive after its departure. This requirement will necessitate adjustments to the matching algorithm.

Finally, important KPIs will be evaluated to assess the performance of such a system in a typical urban setting. The expected results are anticipated to resemble those from the first project phase, examples of which are illustrated in the following figures:

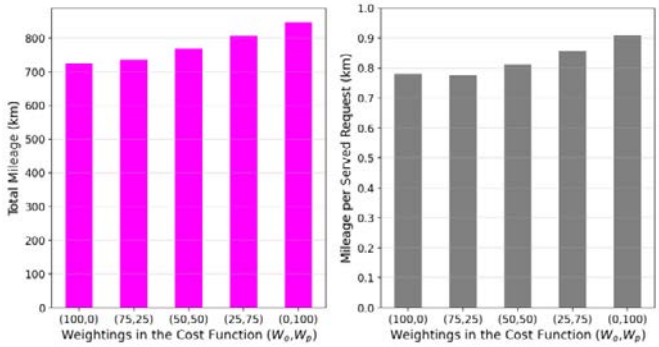


Figure 2: Impact of weightings in the cost function on total mileage and mileage per served request (W_o: weight of operator, W_o: weight of passenger).

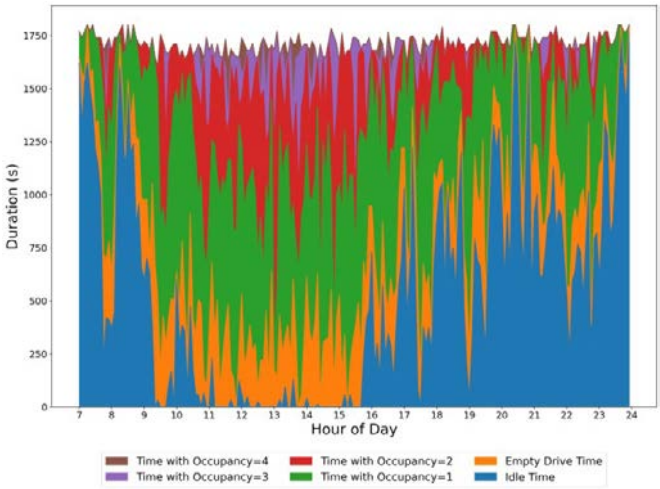


Figure 3: Utilization of the on-demand fleet (in 5-minutes aggregation).

Last but not least, evacuation scenarios for planned or unplanned large-scale events on the campus will be simulated as part of this work package. Here, optimized routing algorithms will be applied further, and the simulations will be employed to observe whether the implemented measures achieve the desired effect.

IV. References

[1] O. Arslan and S. Hoffmann (2024). Implementierung eines spontanen Matching-Algorithmus für On-Demand Shuttle-Systeme in der Mikrosimulation. Heureka - Optimierung in Verkehr und Transport 2024, Stuttgart, Germany.

[2] O. Arslan and S. Hoffmann (2025). Impacts of On-Demand Shuttle System Parameters on its Metrics: A Microsimulation Study. Transportation Research Procedia, 86, 491–499.

[3] O. Arslan and S. Hoffmann (2025b). Integration of On-Demand Ride-Pooling into a Microscopic Traffic Flow Simulation Environment. 11th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS), Porto, Portugal.

[4] TomTom Move (2026). https://move.tomtom.com (accessed on 11.01.2026)

[5] J. Alonso-Mora, S. Samaranayake, A. Wallar, E. Frazzoli, and D. Rus (2017). On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114(3), 462–467.

[6] O. Arslan (2026). Modeling an On-Demand Ride-Pooling System in Multimodal Microscopic Traffic Simulation [Dissertation]. University of the Bundeswehr Munich (to be published soon).

***Short Biography Author* — Oytun Arslan graduated from Transportation Systems in TUM in 2009 and has worked in various international projects in the transportation field before starting to work as a research assistant at the Chair of Intelligent, Multimodal Transportation Systems in December 2019. In the first MORE project, he was responsible for the microscopic traffic simulation as well as the implementation of an on-demand shuttle operation in the university campus, on which he has written his doctoral thesis. In the current MORE project, he is dealing with the on-demand shuttle implementation for the district of Neubiberg, as well as the evacuation scenarios of the university campus using on-demand shuttles.**

Anomalieerkennung mit Echtzeitverkehrsdaten

Korbinian Engel, M.Sc.

I. Forschungsschwerpunkt

Zur Bearbeitung des Arbeitspakets Anomalieerkennung mit Echtzeit-Verkehrsdaten (PSP 1.5.1) wird ein Kamerasystem zur Verkehrsdatensammlung auf dem Campus der Universität der Bundeswehr München verwendet. Das Kamerasystem erzeugt Trajektorien aller Verkehrsteilnehmenden klassifiziert nach Verkehrsmodi [1]. Die erzeugten Daten des Kamerasystems werden in Elasticsearch, eine state-of-the-art Such- und Analytik-Engine mit Datenspeicherung, übertragen [2]. Für die Anomalieerkennung der Verkehrsmuster werden die Datenparameter Uhrzeit, Bereich der Erfassung und Verkehrsmodi relevant.

II. Vorgehensweise

Für ein besseres Verständnis der Algorithmen zur Anomalieerkennung wird die Anomalieerkennung aus Elasticsearch mit einem einfachen Modell verglichen.

In Elasticsearch basiert die Anomalieerkennung auf dem Robust Random Cut Forest, welcher Anomalien in Datenstrukturen entdeckt und über den CoDisp-Wert bewertet [3]. Die Anomaliebewertung/Anomaliescores in Elastic liegt im Bereich von 0 und 100. Zusätzlich nutzt Elasticsearch weitere statistische Funktionen, um die Wahrscheinlichkeit eines Wertes zu ermitteln [4].

Das einfache Vergleichsmodell basiert auf einer Probability Density Function mit individuell einstellbaren Perzentilen. Es werden zwei Probability Density Functions für die Wochentage Montag bis Freitag und Samstag bis Sonntag modelliert, um die heterogenen Tagesverläufe zwischen Werktag und Wochenende differenziert zu betrachten. In diesem Modell wird eine Anomalie erkannt, wenn der Wert außerhalb der Perzentile liegt. Die Bewertung der Anomalie basiert auf dem Abstand zum gewählten Perzentil, normiert auf Werte zwischen 0 und 100, um die Vergleichbarkeit beider Modelle zu gewährleisten.

Für die Anomalieanalyse werden die Datensätze in mehreren Szenarien mit divergierenden Datengrundlagen, Bucket Spans und Verkehrsmodi untersucht. Die Datengrundlage beschreibt hierbei die Datenmenge, die den Modellen zur Verfügung steht. Bucket Span beschreibt eine Unterteilung der Datengrundlage in Zeiträume, in welchen die jeweiligen Daten über einfache mathematische Funktionen aggregiert werden. Für die hier durchgeführte Analyse wird die Summe der Daten je Bucket Span genutzt. Als Verkehrsmodi werden Pkw, Radfahrende, Fußgänger*innen und die Summe aller Verkehrsmodi in der Analyse verwendet.

Es werden mehrere Datengrundlagen zwischen einer Woche und einem Jahr und mehrere Bucket Spans zwischen einer Minute und einer Stunde in einzelnen Szenarien berechnet und verglichen. Pro Datensatz ergeben sich aufgrund der divergierenden Datengrundlagen und Bucket Spans 80 Szenarien. Insgesamt liegen 18 vollständige Datensätze vor, was in Summe zu 1.440 Szenarien führt.

III. Ergebnisse 2025

Die erste Analyse umfasst die in Tabelle 1 beschriebenen Parameter. Insgesamt wurden 10.800 Datenpunkte für die erste Anomalieanalyse genutzt.

Tabelle 1: Parameter der ersten Analyse

Datensatz	Cam_3_3_North_Exit_1M_Distr
Datengrundlage	30 Tage (01.07. – 31.07.2024)
Bucket Span	15 min
Verkehrsmodi	bicycle
Gewähltes Perzentil	95 % (2,5 % - 97,5 %)

In Abbildung 1 und in Abbildung 3 ist der gesamte Datensatz bzw. ein Ausschnitt aus dem Datensatz mit dem aus Elasticsearch berechneten Modell inklusive der Anomaliescores dargestellt.

In Abbildung 2 und in Abbildung 4 ist der gesamte Datensatz bzw. ein Ausschnitt aus dem Datensatz mit dem einfachen Modell inklusive der Anomaliescores dargestellt.

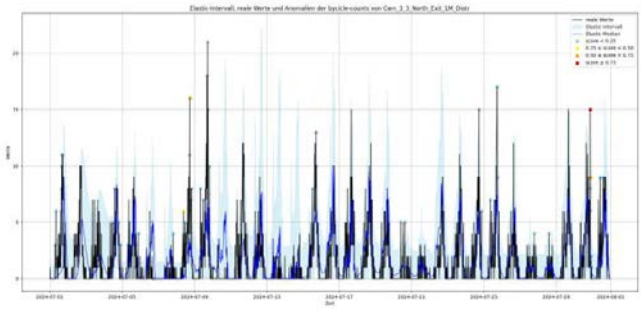


Abbildung 1: Datensatz gesamt mit Elastic-Modell

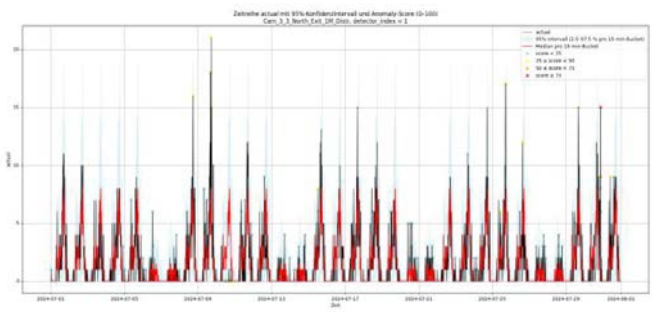


Abbildung 2: Datensatz gesamt mit einfachem Modell

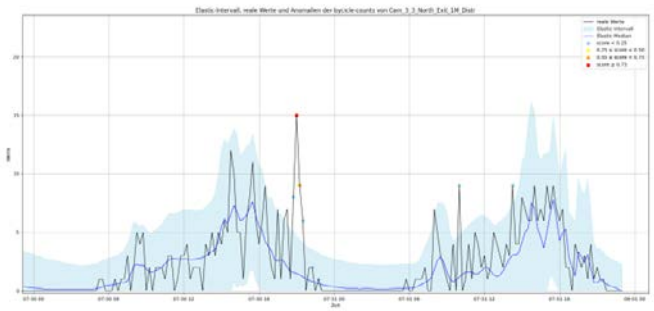


Abbildung 3: Datensatz Ausschnitt mit Elastic Modell

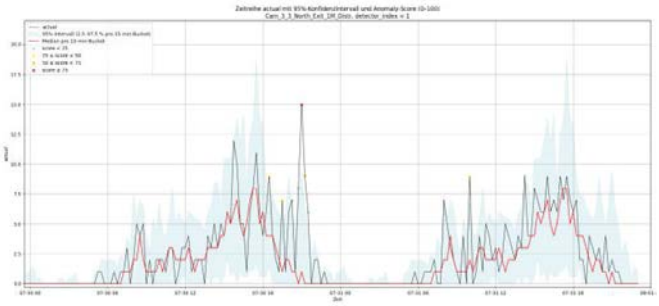


Abbildung 4: Datensatz Ausschnitt mit einfachem Modell

Zur Analyse der Anomalieerkennung der beiden Modelle werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Vergleich der Anzahl der erkannten Anomalien beider Modelle im betrachteten Zeitraum
- Vergleich der erkannten Anomalien über die Stunden der Wochentage

Für den Zeitraum der Datengrundlage (01.07. – 31.07.2024) haben beide Modelle Anomalien erkannt. In Abbildung 5 ist die Übersicht der erkannten Anomalien dargestellt. Die Anomalieerkennung von Elastic hat insgesamt 65 Anomalien erkannt, das einfache Modell hat insgesamt 130 Anomalien erkannt. Das entspricht 0,6 % bzw. 1,3 % aller Werte. In 26 Fällen haben beide Modelle die identischen Datenpunkte als Anomalie erkannt.

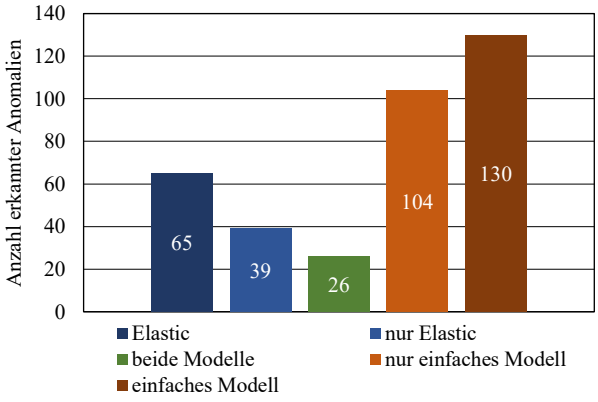


Abbildung 5: Übersicht der erkannten Anomalien

Die Anzahl der erkannten Anomalien des einfachen Modells liegt über der Anzahl der erkannten Anomalien des Elastic-Modells. Mögliche Ursachen hierfür könnten die geringe Datenbasis für Anomalien am Wochenende sein oder eine geringe Streuung der Daten in den Nachtstunden. In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind die Anomalien beider Modelle in einer Heatmap für Wochentage und Tageszeit dargestellt.

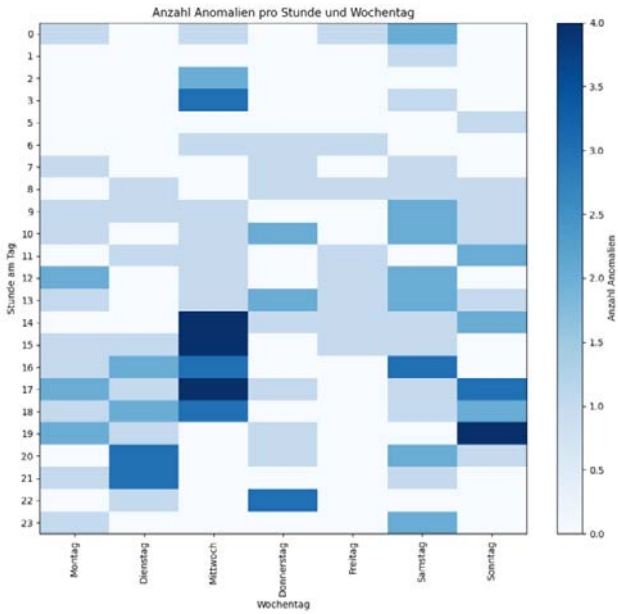


Abbildung 6: Heatmap der Anomalien des einfachen Modells

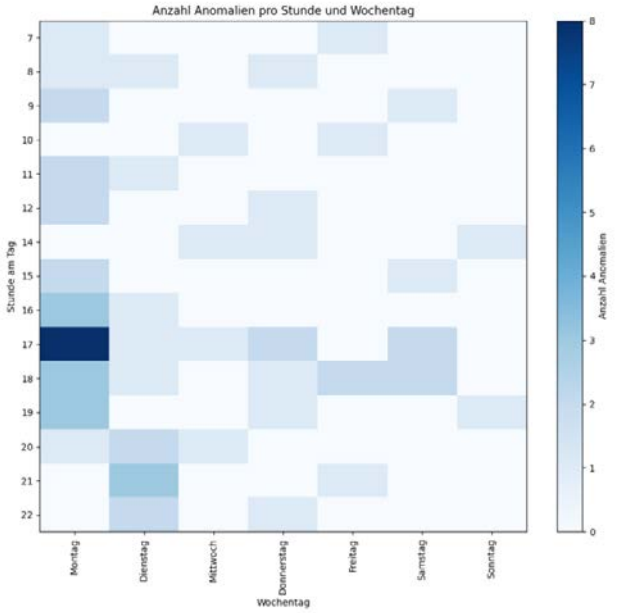


Abbildung 7: Heatmap der Anomalien des Elastic-Modells

Das einfache Modell erkennt insbesondere am Mittwochnachmittag und Sonntagabend Anomalien, die das Elastic-Modell nicht als Anomalien einstuft. Das einfache Modell hat für Wochentage (Montag bis Freitag) und das Wochenende (Samstag und Sonntag) zwei individuelle 95%-Perzentile über den Tagesgang. Die Anomalien am Mittwochnachmittag lassen sich dadurch erklären, dass Mittwochnachmittags aufgrund militärischer Verpflichtungen der Studierenden grundsätzlich keine Lehrveranstaltungen gehalten werden, was zu einem veränderten Mobilitätsverhalten führt. Die erkannten Anomalien am Sonntagabend deuten auf hohe Ankunftszahlen zum Campus hin, die nicht einem typischen Wochenendtag entsprechen.

Aufgrund der starren Tagesganglinien des einfachen Modells werden in den beiden Fällen Anomalien erkannt, die bedingt durch die Situation auf dem Campus nicht anormal sind. Das Elastic-Modell erkennt das Muster besser und stuft in diesen Situationen keine bzw. weniger Datenpunkte als Anomalie ein.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Die oben vorgestellten Ergebnisse der Anomalieanalyse stellen lediglich ein einzelnes Szenario dar und sollen die Möglichkeiten, Potenziale und Grenzen der Anomalieanalyse in Elasticsearch und mittels eines einfachen Modells aufzeigen. Für das nächste Jahr wird die Analyse nach dem vorgestellten Konzept durchgeführt. Des Weiteren werden Einflüsse auf die Anomalieerkennung und die Prognose als weiteres Tool des Machine Learnings in Elasticsearch mit den Verkehrsdaten des Campus und unter dem Hintergrund von Evakuierungsszenarien getestet und evaluiert.

Literaturverzeichnis

[1] DataFromSky, „https://intercom.help/datafromsky/en/articles/3772980-about-flow,“ [Online]. [Zugriff am 07. Jan. 2026].

[2] Elasticsearch B.V., „www.elastic.co/de,“ [Online]. Available: https://www.elastic.co/de/elasticsearch. [Zugriff am 07. Jan. 2026].

[3] S. Guha, N. Mishra, G. Roy und O. Schrijvers, „Robust random cut forest based anomaly detection on streams,“ *International conference on machine learning,* pp. 2712-2721, 2016.

[4] Elasticsearch B.V., „Machine Learning and Statistical Methods for Time Series Analysis,“ 08. Mrz. 2017. [Online]. Available: https://www.elastic.co/elasticon/conf/2017/sf/machine-learning-and-statistical-methods-for-time-series-analysis. [Zugriff am 07. Jan. 2026].

***Kurzbiographie Autor* — Korbinian Engel, M.Sc. ist seit Oktober 2025 im Forschungsprojekt MORE als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig und für das Arbeitspaket Anomalieerkennung mit Echtzeit-Verkehrsdaten (PSP 1.5.1) verantwortlich. Er hat an der DHBW Mosbach Bauingenieurwesen (B.Eng., 2021) und an der UniBwM Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften (M.Sc., 2023) studiert. Zwischen 2023 und 2025 hat er Erfahrung als Projektleiter Straßenplanung gesammelt.**

Mobile Feinstaubmessung zur Erfassung der Belastung von Radfahrenden

Hanna Grüsner

I. Forschungsschwerpunkt

Radfahrende haben aufgrund ihrer erhöhten Atemfrequenz durch die körperliche Betätigung eine viermal höhere Exposition durch Emissionen. Faktoren, welche die Feinstaubexposition beeinflussen, sind Tageszeit, Routenwahl und Fahrzeit [1]. Im Rahmen des Arbeitspakets werden diese Faktoren im Raum München untersucht werden, indem ein Routenvergleich zu verschiedenen Tageszeiten mit Low-cost Sensorik durchgeführt wird.

II. Vorgehensweise

Im Berichtsjahr 2025 umfasst die Vorgehensweise eine Literaturrecherche zu mobilen Feinstaubmessungen, unterstützt durch eine Anforderungsliste für das Equipment sowie eine Benchmark-Analyse bestehender Sensoren und deren Anwendung in der Forschung. Auch zu Kalibrierverfahren wurde eine Literaturrecherche durchgeführt.

Darüber hinaus erfolgte die Installation und Inbetriebnahme einer stationären Referenzmessstation, siehe Abbildung 1 an der Hauptwache, die sowohl zur Validierung der Low-Cost-Sensoren als auch zur langfristigen Erfassung der Luftqualität am Haupteingang des Campus dienen soll.



Abbildung 1. Umwelt- und Wettersensor, Hauptwache (eigene Darstellung)

Die Messrouten sollen jeweils zwei Strecken mit demselben Ziel- und Endpunkt vergleichen, von denen eine möglichst verkehrsarm und begrünt ist und die andere an einer eher verkehrsstarken Straße entlangführt. Um die Relevanz der Untersuchung zu erhöhen, sollen die Routen möglichst stark von Radfahrenden genutzt werden. Bei einer explorativen Befragung von aktiven Ehrenamtlichen, die sich im Stammtisch für Mobilität und Verkehrswende sowie bei MunichWays des Green City e. V. engagieren, wurden Punkte zusammengetragen, die aus der Perspektive der lokal verkehrspolitisch engagierten Akteure eine hohe Relevanz haben. Damit die Auswertung weitere Daten berücksichtigen kann, sollen die Routen entlang der Luftmessstellen des Umweltbundesamtes (UBA) und über die in München fest installierten Radzählmessstellen verlaufen.

Überlegungen, wann und wie viele der geplanten Messungen durchzuführen sind, werden auf Basis der Radzählmessstellen sowie der Richtlinien für die Straßenverkehrszählung (SVZ) [2] gemacht.

III. Ergebnisse 2025

Die Literaturrecherche ergab folgende Anforderungen an die Sensorik für das Vorhaben: akkubetriebener Einsatz, Messung von Feinstaub ($PM_{2.5}$ und PM_{10}), integrierte Sensoren für Luftfeuchtigkeit, Temperatur und GNSS, ein Messintervall von 1–10 s sowie Eignung für mobile Messungen. Darüber hinaus sollten die Sensoren bereits in wissenschaftlichen Arbeiten untersucht, kostengünstig und idealerweise mit wetterfestem Gehäuse sowie Befestigungsmöglichkeiten ausgestattet sein. Temperatur und Luftfeuchtigkeit sind relevant für die Kalibrierung der Feinstaubwerte [3].

Als Sensoren, die die genannten Anforderungen erfüllen, wurden der AirBeam 3 [4], [5], [6] sowie der Sodaq Air identifiziert [7]. Das Vorhaben sieht diese Anordnung vor: Ein Sensor misst permanent neben einer offiziellen bzw. zertifizierten Messstation als Referenz und Grundlage zum Kalibrieren. Zwei mobile Sensoren messen zeitgleich die zu vergleichenden Routen. Jeweils ein bis zwei der Sensoren sind ebenfalls während der Messfahrten stationär entlang der Routen, um auch stationäre Messungen mit mobilen Messungen vergleichen zu können. Für belastbare und vergleichbare Werte sollten alle Sensoren baugleich sein. [4], [5], [6], [7]. An den stationären Messpunkten sollen zusätzlich Feinstaub Passivsammler installiert werden, um die detektierten Partikel qualitativ der spezifischen Quelle zuzuordnen.

Es wurde ein vollständiges und funktionsfähiges Mess-Setup definiert, das eine Befestigung und Stromversorgung berücksichtigt, siehe Abbildung 2.

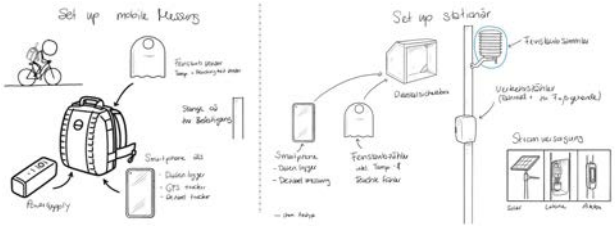


Abbildung 2. Mess Set-Up (eigene Darstellung)

Aus der Literatur geht hervor, dass durchaus belastbare Daten mit Low-Cost-Sensoren erhoben werden können, sofern die Daten kalibriert werden [3], [4], [5], [6], [8], [9]. Die in der Literatur beschriebenen Verfahren werden an einem

Beispieldatensatz (erhoben 2023, Messgerät: Vaisala; Referenzgerät: Horiba) erprobt und sind in Abbildung 3 zu sehen. Abbildung a) zeigt die bereinigten Daten ohne Kalibrierung: Der Test-Sensor unterschätzt die PM2.5-Werte systematisch gegenüber der Referenz (Punkte deutlich unter der Ideallinie). Die getesteten Methoden der Kalibrierung sind lineare Regression, Quantile Mapping und Random Forest [5], [8], [9]. Abbildung 3 b) und c) zeigen eine Kalibrierung mit linearer Regression (RMSE: 1,421 µg/m³) bzw. mit dem Quantile Mapping (RMSE: 1,517 µg/m³). Der systematische Bias wird deutlich reduziert, der Trend folgt der Ideallinie besser, allerdings bleibt eine erhebliche Streuung. Der Root-Mean-Square-Error (RMSE) ist etwas besser bei der linearen Regression. Abbildung 3 d) zeigt das Ergebnis der Kalibrierung mit der Random-Forest-Methode, wobei sich die Werte sehr nah an der Ideallinie befinden, was jedoch auf Overfitting schließen lässt. Für das Projekt ist eine Kalibrierung durch lineare Regression zu empfehlen, wobei der Datensatz zuvor von Ausreißern bereinigt werden sollte.

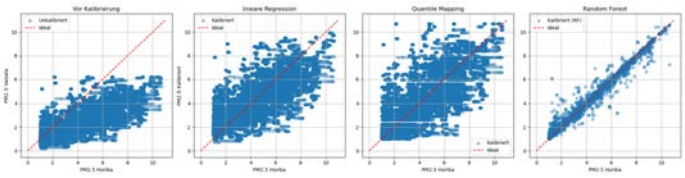


Abbildung 3. Vergleich der Kalibriermethoden mit einem Testdatensatz a) Zeigt die bereinigten Daten ohne Kalibrierung, Kalibrierung mittels b) linearer Regression, c) Quantile Mapping d) Random Forest

Die Messpunkte, welche die bereits genannten Anforderungen erfüllen sind in Abbildung 4 gezeigt. Zwei mögliche Test-Routen konnten unter deren Berücksichtigung abgeleitet werden.

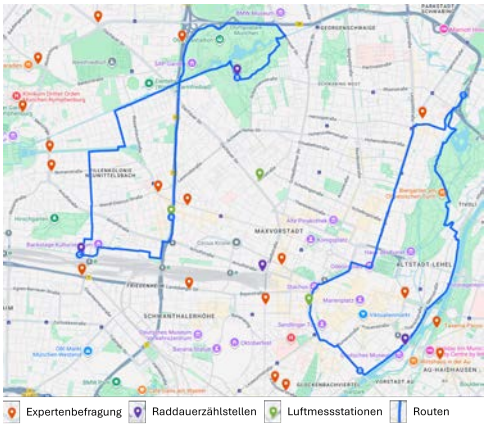


Abbildung 4. Messpunkte (eigene Darstellung mittels Google My Maps)

Untersuchungen, wann die Messungen durchgeführt werden sollten, sind in Abbildung 5 gezeigt. Im Vorjahr zeigen die Monate April bis Oktober ein signifikant hohes Aufkommen des Radverkehrs. Die Ferien haben keinen erheblichen Einfluss auf den Radverkehr. Im Vergleich der Wochentage geht hervor, dass die Tage mit dem größten Verkehrsaufkommen den empfohlenen Tagen der SVZ entsprechen [2]: Dienstags und mittwochs, gefolgt von donnerstags und montags. Die Rushhour trifft zwischen 7:15 und 9:15 Uhr und nachmittags zwischen 16:45 und 19:30 Uhr ein.

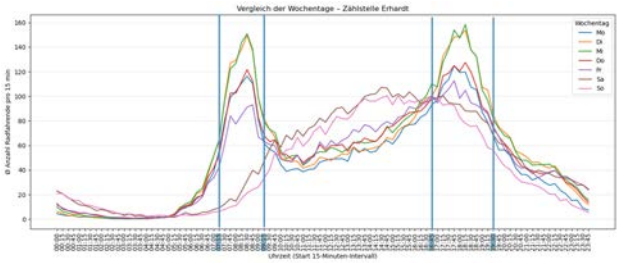


Abbildung 5. Analyse der Radverkehrsaufkommens mittels Radzählmessstellen in München Vergleich der Wochentage (eigene Darstellung)

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Im Jahr 2026 ist die operative Umsetzung des beschriebenen Vorhabens vorgesehen. Nach Lieferung der erforderlichen Materialien sollen die geplanten Messfahrten durchgeführt und anschließend ausgewertet werden. Parallel dazu ist zur Durchführung des Kalibrierverfahrens eine permanente Referenzmessung vorgesehen, um eine kontinuierliche Vergleichsbasis sicherzustellen.

V. Literaturverzeichnis

[1] M. Fischer, J. Dröge, M. Braun, and D. A. Groneberg, "Die feinstaubbelastung radfahrender im innerstädtischen straßenverkehr," vol. 73, no. 3, pp. 136–146. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s40664-023-00494-0

[2] "Richtlinien für die straßenverkehrszählung (SVZ) auf den bundesfernstraßen im jahr 2025."

[3] M. R. Giordano, C. Malings, S. N. Pandis, A. A. Presto, V. F. McNeill, D. M. Westervelt, M. Beekmann, and R. Subramanian, "From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors," vol. 158, p. 105833. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850221005644

[4] M. J. Brannin, "Fall evaluation and calibration of low-cost aerosol sensors." [Online]. Available: http://hdl.handle.net/10342/13600

[5] J. Huang, M.-P. Kwan, J. Cai, W. Song, C. Yu, Z. Kan, and S. H.-L. Yim, "Field evaluation and calibration of low-cost air pollution sensors for environmental exposure research," vol. 22, no. 6, p. 2381, publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/6/2381

[6] A. Lopez-Encuentra, E. Gil Cid, V. Abraira, and L. M. Pozo Coronado, "Performance evaluation and utility of low-cost particulate matter sensor." [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/abstract=4820935

[7] P. B. Tchounwou and O. Han, "International journal of environmental research and public health best paper award 2013," vol. 10, no. 1, pp. 443–445, publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1660-4601/10/1/443

[8] M.-L. Aix, M. Claitte, and D. J. Bicout, "A low-cost sensors study measuring exposure to particulate matter in mobility situations," in *SENSORNETS 2023 Proceedings of the 12th International Conference on Sensor Networks*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, pp. 32–41. [Online]. Available: https://hal.science/hal-04098181

[9] J. Venkatraman Jagatha, A. Klausnitzer, M. Chacón-Mateos, B. Laquai, E. Nieuwkoop, P. van der Mark, U. Vogt, and C. Schneider, "Calibration method for particulate matter low-cost sensors used in ambient air quality monitoring and research," vol. 21, no. 12, p. 3960, publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/12/3960

SIMULATOR STUDY ON CAR USER'S PERCEPTIONS IN INTERACTION WITH AUTONOMOUS SHUTTLES.

Sagar Meda Badareesh, Eftychios Papapanagiotou

I. Research Focus

Research activities address human factors in mixed-traffic environments during the introduction of autonomous shuttles, with emphasis on perceived safety, perceived stress, and perception of the driving environment among conventional car drivers. Autonomous shuttle deployment in a campus mobility ecosystem offers potential benefits for sustainable transport and operational efficiency; however, uncertainty in interactions with automated vehicles can influence driver judgment and behavioural adaptation. Empirical investigation of perception-related effects supports risk-aware and user-centred integration of autonomous shuttles into existing traffic systems.

A simulator-based research framework combines a static driving simulator with a microscopic traffic simulation model to reproduce realistic campus traffic conditions and controlled encounters between a passenger car and a shuttle. Two scenarios with identical route geometry and traffic demand are implemented: a conventional shuttle condition and an autonomous shuttle condition, with the automation context introduced via participant briefing while maintaining identical shuttle behaviour, enabling isolation of automation-related perception effects. Structured post-drive questionnaires and statistical evaluation quantify perceived safety, perceived stress, and environmental perception, contributing evidence for safety assessment, acceptance, and operational design of autonomous shuttle services in campus settings.

II. Methodology

The experimental design was guided by two primary hypotheses addressing human factors in mixed traffic. The first hypothesis (H1) postulates that the presence of an autonomous shuttle within the campus traffic environment influences behavioural and psychological responses of conventional car drivers, particularly perceived safety, perceived stress, and perception of the driving environment. The second hypothesis (H2) assumes a direct relationship between perceived safety and perceived stress, suggesting that lower perceived safety levels contribute to increased stress during driving tasks. These hypotheses were formulated to isolate perception-based effects of vehicle automation under otherwise identical traffic and infrastructure conditions, thereby enabling a focused evaluation of automation-related influences independent of observable vehicle behaviour.

The experimental design integrates a static driving simulator, as shown in Figure 1, to provide an immersive and controlled driving environment, representing a virtual replica of the study area. The transportation network and related infrastructure were modelled using OpenDRIVE data in accordance with the ASAM standard, based on detailed geometric information obtained from a campus survey conducted in 2015 by 3D Mapping Solutions [1]. The simulation framework combines multiple software tools with distinct functionalities: Vector DYNA4 serves as the central platform for scenario management, vehicle dynamics, and experiment execution, enabling configuration and handling of the Vehicle under Test (VuT) [2]. Vector CANoe provides a comprehensive interface for simulator communication and signal handling, including the implementation of collision detection mechanisms [3]. MATLAB and Simulink operate in the background to support control logic, signal processing, and vehicle behaviour modelling through dedicated block models [4], [5]. Additionally, the microscopic traffic simulation tool SUMO is coupled with DYNA4 to generate and control realistic traffic demand and interactions within the virtual environment [6]. The coordinated integration of these tools enables a consistent, flexible, and reproducible simulator environment suitable for controlled human factors research.



Figure 1: Static Driving Simulator

The experimental procedure followed a structured, multi-stage protocol to ensure participant readiness and data quality. The study began with a briefing session and completion of a demographic questionnaire, followed by a dedicated training drive to familiarize participants with simulator controls and dynamics. Simulator sickness was assessed using the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) before and after training. Each participant then completed two driving scenarios in a fixed order: one scenario featuring a conventional shuttle and a second scenario presented as involving an autonomous shuttle, with all traffic behaviour and route characteristics remaining identical. After each scenario, participants completed a scenario-specific questionnaire assessing perceived safety, perceived stress, and environmental perception, followed by

qualitative feedback. This procedure enabled systematic comparison of perception-based responses across both scenarios under controlled experimental conditions.

III. Results 2025

The results analysis is based on a combination of qualitative survey data and non-parametric statistical evaluation. This study emphasizes three key factors in relation to conventional car drivers within the study area: perceived safety, perceived stress, and perception of the driving environment. These parameters were measured using structured post-scenario questionnaires and evaluated to capture subjective responses to interactions with the shuttle. To identify differences between the two independent scenarios, the Mann–Whitney U test was incorporated, as it is suitable for ordinal data, small sample sizes, and non-normally distributed datasets, and one of the parameters, Perceived safety, is discussed here.

Perceived safety corresponds to the safety ratings provided by participants when interacting with either the conventional or the autonomous shuttle, depending on the scenario. Safety perception was measured using a seven-point Likert scale, where higher values indicate higher perceived safety. As illustrated in Figure 6, participants reported noticeably higher perceived safety when interacting with the conventional shuttle. Descriptive statistics for 22 participants show a higher mean perceived safety for the conventional shuttle (M = 5.909, SD = 1.151) compared to the autonomous shuttle (M = 2.818, SD = 1.816), even though shuttle driving behaviour was identical in both scenarios and differed only in the communicated automation level.

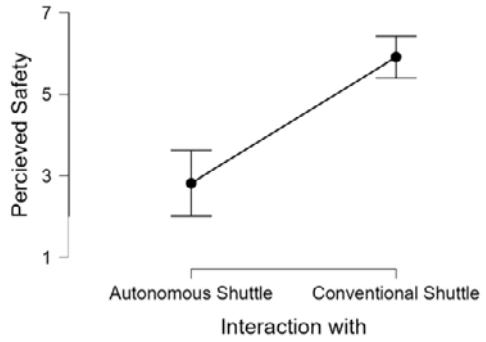


Figure 1: Perceived Safety of Conventional Car Drivers

In summary, the study shows that the introduction of autonomous shuttles can significantly influence conventional car drivers' perceptions, even when traffic conditions and vehicle behaviour remain identical. The simulator-based approach highlights that perceived safety is notably lower when drivers are informed about the presence of an autonomous shuttle, whereas other perception-related factors exhibit less pronounced changes. These findings emphasize that acceptance and safety assessment of autonomous shuttles are strongly shaped by perception and expectation rather than technical performance alone, underlining the importance of human-centred considerations in the integration of autonomous shuttles into campus traffic environments.

IV. Outlook and next steps for 2026

Future work in 2026 will extend the simulator-based research toward driving behaviour in critical and emergency events within the UniBwM campus context. Evacuation scenarios for the campus are currently under development, and a virtual campus environment will be developed to simulate emergency and evacuation situations using SiLab driving simulators. These simulations will support the analysis of driver decision-making and car-following behaviour under non-standard conditions. In later stages, the developed framework can be expanded to include bicycle and pedestrian simulators, enabling multimodal analysis of evacuation scenarios.

In the next phase of 2026, connected simulator setups and controlled simulator studies will be used to observe and quantify behavioural deviations from standard driving behaviour in emergency scenarios. The findings will contribute to the improvement of existing car-following and traffic models by incorporating emergency-specific behavioural characteristics. In the longer term, the developed simulation environment and methodology can be extended beyond car traffic and adapted to include bicycle and pedestrian simulators, enabling a multimodal analysis of evacuation and critical-event scenarios within the campus environment.

References

[1] Association for Standardization of Automation and Measuring Systems (ASAM), „OpenDRIVE – Standard for the Description of Road Networks," 2024.

[2] Vector Informatik GmbH, „DYNA4 – Simulation and Virtual Testing Platform," 2024.

[3] Vector Informatik GmbH, „CANoe – Software-in-the-Loop Testing Platform," 2024.

[4] The MathWorks, Inc., „MATLAB Documentation," 2024.

[5] The MathWorks, Inc., „Simulink Documentation," 2024.

[6] D. Krajzewicz, J. Erdmann, M. Behrisch und L. Bieker, „Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban Mobility," *International Journal on Advances in Systems and Measurements,* Bd. 5, Nr. 3–4, p. 128–138, 2012.

***Short Biography of Author* — Sagar Meda Badareesh is a researcher in the field of Intelligent Transportation Systems with a focus on traffic simulation and human factors in transportation. Research activities include driving simulator studies and microscopic traffic modelling to analyse driver behaviour and perception in mixed-traffic environments. Current work addresses interactions with emerging mobility solutions and the modelling of critical and emergency traffic scenarios.**

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

MOBILITÄT & VERKEHR

Prof. Dr.-Ing. Axel Leonhardt

Verkehrsanalyse

Pascal Leone, M. Sc.

I. Motivation

Das mikroskopische Verkehrssimulationsprogramm VISSIM der PTV AG wird als ein Standard-Werkzeug zur Untersuchung von verkehrstechnischen und verkehrsplanerischen Dienstleistungen eingesetzt. Die Versatilität des Programms und die Reproduzierbarkeit seiner Ergebnisse ermöglichen ebenso den Einsatz zu Forschungszwecken. Eine Möglichkeit ist hier die Generierung von Trajektorien für jeden simulierten Verkehrsteilnehmer. Das Programm gibt neben den spezifisch festgelegten Auswertungen auch die exakten Fahrwege und zusätzliche Informationen je Zeitschritt aus. Die damit erstellbaren Trajektorien entsprechen im Wesentlichen der Wahrheit des Verkehrsgeschehens unter der Voraussetzung einer erfolgreich durchgeführten Modellierung und Kalibrierung.

Im Vergleich dazu sind real aufgezeichnete Trajektorien grundsätzlich mit Messfehlern behaftet, welche technische und physikalische Gründe haben können. Je nach Detektionsmethode werden Messgrößen nicht absolut exakt, sondern mit einer prinzipiellen Unschärfe aufgezeichnet, welche nicht-trivial ist. Typische Beispiele sind Technik und Forschung bekannt, allerdings nicht immer quantifiziert. In Bezug auf die Videodetektion liegt beispielsweise eine Ungenauigkeit durch die Kamera-Auflösung oder die spezifische Kamerahöhe vor.

Dadurch sind die Trajektorien aus echten Datenquellen nicht identisch mit den aus der Simulation gewonnenen Trajektorien. Die Idee des Arbeitspakets ist es folglich eine gemeinsame Datengrundlage zu schaffen, die die Vergleichbarkeit und Optimierung von Trajektorien aus unterschiedlichen Datenquellen ermöglicht.

II. Vorgehensweise

Um die Trajektorien der Simulationsläufe aus ihrer exakten Form in eine realistische zu überführen, musste eine Evaluation der existierenden Ungenauigkeiten von realen Detektionsmethoden erfolgen.

Dafür wurden eine zeitsynchrone Datenaufnahme mehrerer Detektionssysteme durchgeführt mit dem Ziel, für belegbare Verkehrssituationen exakt validierbare Ungenauigkeiten ermitteln zu können. Durch den Einsatz der bisher entwickelten technischen Fähigkeiten (Mast-Anhänger, Drohne, RSU der Forschungsknotenpunkte) konnten nachweisbar und qualitätsgesichert die Fahrwege mehrerer Fahrzeuge auf der Universitätseigenen Teststrecke aufgezeichnet werden. Unter freundlicher Beteiligung der MORE-Kollegen der Professur Ingenieursmathematik konnten hier ebenfalls hochgenaue Differential GPS-Datensätze („DGPS“) gesammelt werden, welche im Nachgang einen hohen Stellenwert bzgl. Datengenauigkeit der anderen Erfassungssysteme sicherstellen.



Abbildung II-1: Ausstattung des Referenzfahrzeugs mit Messtechnik

Nach dem erfolgreichen Aufstellen einer repräsentativen Datenbasis wurden die Daten ausgewertet und einer Bewertung unterzogen, die im Anschluss ihren Eingang in die Simulation fand.

Als vergleichendes Mittel konnten mittels videobasierter Trajektoriengenerierung („DataFromSky FLOW“) ebenfalls solche Daten aus einem VISSIM-Video erzeugt werden. Dies stellt einen wichtigen Schritt auf dem Weg zur Vergleichbarkeit der Datensätze dar. Somit besteht die Möglichkeit, exakte VISSIM-Trajektorien mit relativ unscharfen FLOW-Trajektorien vergleichbar zu machen und die Unschärfe auch zu quantifizieren.

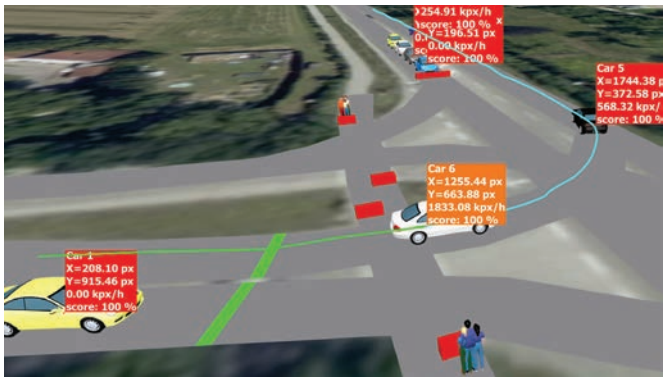


Abbildung II-2: Trajektorien generiert aus deinem VISSIM-Video

Im Bereich der Datenfusion wurde ein versatiles Framework erstellt, welches zeitgleich Trajektorien-Rohdaten sämtlicher verwendeter Datenquellen einliest und verarbeitet. Dieses Programm wurde in Python entwickelt und transformiert die unterschiedlichen Trajektorien in ein universelles Format, welches dann den Vergleich der Trajektorien, sowie deren Optimierung (i.F. der Simulation: Verschlechterung) erst ermöglicht. Die unten gezeigten Auswertungen entstammen diesem Framework.

III. Ergebnisse 2025

Zur Feststellung typischer Messungenauigkeiten wurden die durchgeführten Messfahrten ausgewertet. Abbildung III-1 zeigt die Lage der Trajektorien ohne Weiterverarbeitung. Es wurden Erkenntnisse gesammelt, wie in diesem Fall, welche räumliche Abweichung durch die Vorbeifahrt an Videokameras durch die Änderung der räumliche Verzerrung zu erwarten ist.

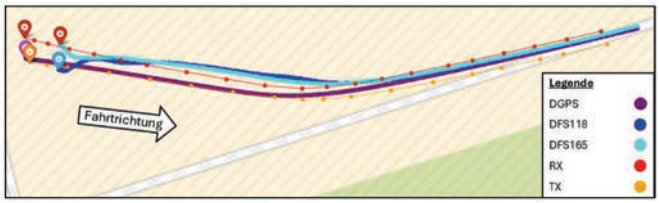


Abbildung III-1: Plot der aufgezeichneten Trajektorien verschiedener Datenquellen

Die Datenquellen wiesen über die beobachteten Zeitreihen verschiedene Abstände zur DGPS-Trajektorie („Ground Truth“) auf. Diese Abweichungen konnten evaluiert werden. Besonders interessant war das Verhalten der videobasierten Trajektorien, die nicht immer grundsätzlich ungenauer waren als herkömmliches GPS (siehe Abbildung III-2).

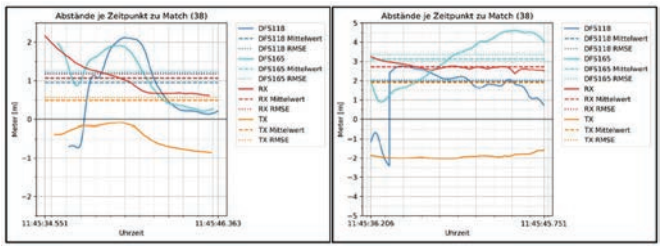


Abbildung III-2: Zeitreihen der Trajektorien

Die allgemeinen Abweichungen von den echten Fahrwegen wurden für jede einzelne Fahrt quantifiziert und wird in Abbildung III-3 exemplarisch dargestellt.

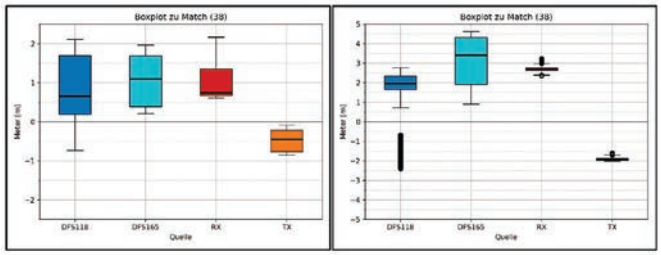


Abbildung III-3: Abweichung der Trajektorien-Genauigkeit von der Ground Truth

Aufbauend auf den Realdaten wurden die identifizierten Ungenauigkeiten in mathematischer Form als Effekte auf die Simulationstrajektorien angewandt. Dies wurde im angesprochenen Framework durchgeführt.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Die bisher in der Simulation durchgeführten Untersuchungen sollen im Jahr 2026 auf die Realität ausgeweitet werden.

Hierfür wurden im Vorfeld wegweisende Vorbereitungen technischer Natur getroffen, die den sofortigen Einsatz der neuen Detektionssysteme ermöglichen. Sämtliche Erfassungssysteme auf Videobasis sind einsatzbereit und können teilweise mehrere Tage autark ihre Arbeit versehen. Die Erzeugung von Trajektorien wird im kommenden Jahr um eine neuartige Messeinheit erweitert werden, die in der Lage sein wird, C-ITS-Daten im Echtzeitbetrieb über einen längeren Zeitraum aufzuzeichnen. Hierbei wird eine funktionalitätsmaximierende Nutzung von WLAN und Mobilfunk-Protokollen entwickelt.

Kurzbiographie Autor —Seit Anfang 2022 ist Pascal Leone an der Professur für Verkehrsinfrastruktur und Verkehrstechnik der Universität der Bundeswehr München als Wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Seine Forschungsschwerpunkte sind Datenerfassung, Detektionssysteme, Simulation und Steuerung von Lichtsignalanlagen.

Simulationsbasierte Analyse des Vehicle-to-Grid-Potenzials in urbanen Quartieren

Dipl.-Ing. Simon Leu

I. Forschungsschwerpunkt

Im Zentrum der Forschung steht die Frage, wie Elektrofahrzeuge im Rahmen von Vehicle-to-Grid (V2G) zur Unterstützung und Stabilisierung urbaner Stromnetze beitragen können. Reale Mobilitätsmuster werden dabei mit lokalen Stromerzeugungs- und Lastdaten verknüpft, um das Lade- und Entladeverhalten einer großen Fahrzeugflotte realitätsnah abzubilden und dessen Auswirkungen auf das Netz abzuschätzen. Auf diese Weise lässt sich quantifizieren, welches Potenzial elektrische Fahrzeuge zur Aufnahme regenerativer Überschüsse, zur Verringerung fossiler Unterdeckungen sowie zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit im Falle eines Blackouts bieten.

Die Forschungsarbeit kombiniert hierfür Mobilitätsdaten des deutschen Mobilitätspanels (MOP) [1] mit öffentlich verfügbaren Energiedaten [2] und überführt beide Informationsquellen in konsistente Wochenprofile. Auf dieser Grundlage entstehen regelbasierte und optimierende Modellvarianten, die ein urbanes Quartier als integriertes Energiesystem simulieren und dessen Wechselwirkungen mit einer synthetischen Elektrofahrzeugflotte detailliert analysieren.

II. Vorgehensweise

Die methodische Umsetzung erfolgte datengetrieben und simulationsbasiert. Zunächst wurden die MOP-Daten so aufbereitet, dass für jede Person im 15-Minuten-Raster konsistente Mobilitätsprofile vorlagen. Fehlende Angaben, Unstimmigkeiten sowie komplexe Haushaltskonstellationen mit mehreren Fahrern oder Fahrzeugen wurden bereinigt, sodass belastbare Fahrzeugnutzungsprofile entstanden.

Diese realen Wochenprofile bilden die Grundlage für die Hochskalierung auf das Untersuchungsquartier Freiham im Münchner Westen. Für das Jahr 2040 wird dort mit rund 40.000 Personen gerechnet, die im Quartier wohnen oder arbeiten. Die Anzahl der Elektrofahrzeuge wird als zentraler Modellparameter geführt; die Verteilung der Fahrzeugnutzungsprofile orientiert sich an den in den MOP-Daten identifizierten Nutzungsmustern.

Darauf aufbauend werden verschiedene Modellvarianten zur Bestimmung der V2G-Potenziale implementiert (Teilprojekt „Ermittlung von V2G-Potentialen“). Regelbasierte Modelle bilden ein einfaches preis- und zustandsabhängiges V2G-Verhalten ab. Nutzendenoptimierte Modelle erzeugen für jedes Fahrzeug kostenminimale Lade- und Entladepläne, während systemoptimierte Modelle Lade- und Rückspeisevorgänge so steuern, dass sowohl Stromüberschüsse als auch Unterdeckungen auf Quartiersebene minimiert werden.

III. Ergebnisse 2025

Im Berichtsjahr wurde die V2G-Potetential-Simulation erstellt. Der vollständige Datenworkflow, von der Aufbereitung der MOP-Daten über die Erstellung und Validierung der Fahrzeugnutzungsprofile bis zur Integration sämtlicher energiewirtschaftlichen Eingangsdaten, wurde erfolgreich implementiert. Für das Quartier Freiham liegt nun eine synthetische Elektrofahrzeugflotte mit realitätsnahen Mobilitätszeitreihen vor, die detaillierte Park- und Fahrverläufe sowie SOC-relevante Verbrauchsdynamiken abbildet. Darüber hinaus wurde eine dynamische Strompreisfunktion entwickelt, die sich an den Intraday-Handelspreisen der Strombörse orientiert und Überschuss- bzw. Unterdeckungssituationen im Quartier abbildet. Auf dieser Basis konnten mit den nutzendenoptimierten Modellen erstmals kostenminimale Lade- und Entladeprofile für jedes einzelne Fahrzeug berechnet werden. Ebenso liegen die Ergebnisse der systemoptimierten Modelle vor.

Erste Ergebnisanalysen zeigen, dass je nach Wochenverlauf und Flottengröße rund 25 bis 40 Prozent der Unterdeckung durch V2G kompensiert werden können und gleichzeitig ein signifikanter Anteil überschüssiger regenerativer Energie in den Fahrzeugbatterien zwischengespeichert werden kann. Die entwickelten Modellvarianten verdeutlichen zudem, dass unkoordiniertes bzw. rein regelbasiertes Laden zu ausgeprägten Lastspitzen führt, während systemoptimierte Modelle die Netzlast glätten und damit zu einer deutlichen Entlastung des lokalen Energiesystems beitragen.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Im Jahr 2026 steht die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage im Mittelpunkt. Im Teilprojekt „Strategien zur Maximierung des Anteils regenerativer Energie durch V2G“ soll untersucht werden, wie dynamische Strompreise und finanzielle Anreize das Lade- und Entladeverhalten beeinflussen und in welchem Umfang diese Mechanismen das lokale Stromsystem entlasten können. Auf Grundlage der bestehenden Modelle werden verschiedene preisinduzierte Verhaltensänderungen simuliert, um deren Auswirkungen auf Lastverschiebung und Überschussnutzung zu bewerten. Im Teilprojekt „V2G für Versorgungssicherheit“ wird analysiert, wie lange ein urbanes Quartier während eines Blackouts durch die in Elektrofahrzeugen gespeicherte Energie versorgt werden kann und welche SOC-Reserven sowie Fahrzeugverfügbarkeiten dafür erforderlich sind.

Ziel des Jahres 2026 ist es, die Wirkung von V2G sowohl im Normalbetrieb, in dem optimierten Einsatz als auch im Blackout-Szenario umfassend zu analysieren und bewerten.

V. LITERATURVERZEICHNIS

[1]L. Ecke, “Deutsches Mobilitätspanel (MOP) - Veröffentlichungen.” Accessed: Sept. 03, 2025. [Online]. Available: https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/veroeffentlichungen.php
[2]“Stromproduktion | Energy-Charts.” Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=de&c=DE&week=48

***Kurzbiographie Dipl.-Ing. Simon Leu* — Der studierte Wirtschaftsingenieur ist seit Anfang 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Verkehrsinfrastruktur und Verkehrstechnik. Im Rahmen seiner Forschung beschäftigt er sich mit der Integration von Elektrofahrzeugen in urbane Energiesysteme, insbesondere mit Vehicle-to-Grid, dynamischen Strompreisen und Resilienzstrategien. Schwerpunkte sind datengetriebene Mobilitätsprofile, V2G-Optimierung sowie die Simulation städtischer Quartiere als Energiesysteme.**

Real-Time Cyclist Platoon Detection Using Fuzzy Clustering.

Sarah Salem.

I. Introduction

Cities are seeing an increase in the number of cyclists due to improved infrastructure, shifting travel patterns, and sustainability goals. At signalized intersections, peak-hour cyclist flows frequently surpass 1,000 riders per direction in cities like Berlin and Munich [4,6]. Although this growth is encouraging, most traffic management systems are focused on vehicles and are unable to recognize new cyclists' behavior, especially when groups or platoons form. Most detection systems still treat cyclists as individual agents or use aggregate counts, missing the chance to identify and react to group behavior, even though cyclist platoons often form because of upstream signals, bottlenecks, or social riding patterns.

These formations, often referred to as platoons, arise from common departure signals, bottlenecks, or social riding behavior. While vehicular platoon control has long been studied and used to optimize green waves, reduce phase loss, and improve signal coordination [3,5], similar logic has rarely been applied to cyclists. Recognizing cyclist platoons could allow cities to prioritize entire groups in a fair and efficient way such as minimizing stop delays, improving safety, and supporting modal shift goals.

Recent studies confirm that cyclists experience delays more acutely than drivers and often overestimate waiting times [1]. Research on cycling behavior at intersections also shows that cyclists tend to form loose groups during red phases, then disperse during greens [2]. Despite this observable pattern, few control strategies can identify and prioritize groups in real time.

This research introduces a real-time fuzzy clustering framework to detect and characterize cyclist platoons based on simulated trajectory data. The goal is to enable signal systems to differentiate between isolated riders and cohesive groups, using behaviorally meaningful features such as expected time of arrival (ETA), group size, and spatial cohesion.

II. Methodology

The proposed framework detects cyclist platoons in real time using simulated trajectory data. It is structured around three components: data logging, fuzzy clustering, and platoon characterization.

A. Cyclist Data Collection

Cyclists are injected with varying speeds and spacing. Their positions, speeds, and timestamps are logged every second through a Python–VISSIM COM interface. A rolling 10-second window of recent data is extracted each step to balance responsiveness and stability.

B. Fuzzy Clustering

Fuzzy c-means (FCM) clustering is applied to each cyclist's feature vector:

$$f_i = [x_i, y_i, v_i, t_i]$$

where x_i, y_i are spatial coordinates, v_i is speed, and t_i is simulation time. FCM assigns membership $u_{\{ij\}} \in [0,1]$ to each cluster j. A cyclist is grouped if:

$$\max_j u_{ij} > 0.6$$

Valid platoons require at least two such cyclists. This filters incidental proximity.

We fixed the number of clusters to $n=3$ based on preliminary testing, which balanced detection flexibility and overfitting. Clusters with low or zero speed are retained and marked with infinite ETA, indicating stopped groups near signals.

C. Platoon Evaluation Metrics

Each platoon is described by:

- ETA: Estimated time until the group's centroid reaches the stop line.
- Size: Number of cyclists in the group.
- Cohesion: Size/(1+Spread_X), where Spread_X is spatial deviation along travel direction.

We also compute fuzzy entropy:

$$H = -\sum_{j=1}^{n} u_{ij} \log(u_{ij}) / \log(n)$$

Lower values indicate confident clustering; higher values reflect ambiguity. These indicators allow the system to interpret group behavior over time.

III. Findings 2025

We tested the framework in six synthetic scenarios and four real-time injection patterns using VISSIM. These cases varied in speed uniformity, volume, and spacing. Two key indicators—cohesion and fuzzy entropy—were used to interpret platoon formation.

A. Synthetic Scenarios

The synthetic scenarios (Sc1–Sc6) varied speed distributions and arrival patterns. Table 1shows that homogeneous, high-volume traffic (Sc1, Sc2) formed strong, confident platoons. Scenario 2 yielded the largest groups and lowest entropy, even with wider speeds. Sparse or erratic cases (Sc5, Sc6) yielded no or small fragmented clusters, confirming that the method avoids false positives.

Table 1

Scenario	Avg. Platoon Size	Cohesion	Entropy
Sc1 (high vol., tight speeds)	4.25	1.61	0.25
Sc2 (high vol., wider speeds)	6.65	2.34	0.20
Sc3 (low vol., staggered)	3.74	2.06	0.33
Sc4 (mixed speeds, medium vol.)	5.04	2.10	0.29
Sc5 (very low vol., wide speeds)	_	_	_
Sc6 (low vol., wide speeds)	3.06	1.72	0.35

B. Real-Time Injection Scenarios

Four COM-based injection patterns simulated more realistic arrivals. Table 2 shows that the Dense and Wave scenarios produced larger platoons but with lower cohesion due to signal-induced queuing. Random and Sparse inputs led to smaller, tighter groups that moved freely. These results confirm that the algorithm adapts to both congested and free-flow conditions, identifying meaningful groups only when present. The cohesion and entropy metrics proved useful for interpreting behavioral realism and detection confidence.

Table 2

Scenario	Avg. Size	Cohesion	% Stopped
Dense	6.7	1.28	42.3%
Wave	5.4	1.75	31.6%
Random	3.9	2.11	24.8%
Sparse	2.3	2.96	11.2%

IV. Discussion and Conclusion 2025

A real-time fuzzy clustering method for identifying and describing cyclists' platoons in urban traffic simulations is presented in this paper. The system uses interpretable attributes, such as estimated ETA, group size, and spatial cohesion, to summarise the behaviour of evolving or loosely formed groups by applying FCM to live cyclist trajectory data. Fuzzy entropy was used to assess clustering confidence across varied scenarios.

The results show that the algorithm responds appropriately across different traffic conditions: forming large, tight platoons under dense and synchronized arrivals, and avoiding false positives when input is sparse or erratic. This balance is critical for real-world applicability, where signal responsiveness must be reliable yet not overly reactive.

Platoon-level detection offers a more behaviorally sensitive view of cyclist demand. Unlike traditional detectors that count isolated users or queues, this approach allows signal systems to respond based on group urgency, size, and tightness. This could improve fairness, reduce delay, and encourage mode shift in high-volume cycling corridors.

While this study does not implement signal control, the computed platoon attributes are designed to support future applications such as green extensions, phase prioritization, or adaptive timing logic. In practice, these detections could be fed into existing traffic controllers via COM or open-source interfaces.

Future work will focus on integrating this detection framework into an operational signal logic, using tools such as VisVAP or Python-based control injection. Additional research is also planned on adapting the number of clusters dynamically and improving real-world integration through camera or sensor data. These steps would enable direct deployment of group-aware signal control for active modes in both simulation and field environments.

References

[1] M. Börjesson and J. Eliasson, "The value of time and external benefits in bicycle appraisal," Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 46, no. 4, pp. 673–683, 2012.

[2] J. Dillen, F. Gosselin, and S. Tellier, "Cyclist behavior at signalized intersections: An empirical study of grouping and following," Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, vol. 73, pp. 427–441, 2020.

[3] F. Dong, X. Zhao, and Y.-H. Chen, "Optimal longitudinal control for vehicular platoon systems: Adaptiveness, determinacy, and fuzzy," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 29, no. 4, pp. 889–903, 2021.

[4] Landeshauptstadt München, Daten zum Radverkehr, 2023. Accessed: Jul. 2025.

[5] J. Li, P. Zhao, and Y. Chen, "A review of platoon-based traffic signal control strategies in urban networks," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 146, p. 103896, 2023.

[6] Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Mobilität, Fahrradverkehr in Zahlen, 2023. Accessed: Jul. 2025.

***Kurzbiographie Autor* — Dr. Sarah Salem holds a Ph.D. in Transportation Engineering from the University of Toronto. She works from 2022 as a Research Associate at Bundeswehr University Munich. Her research interests include optimization of traffic signal systems, Traffic Simulation, and Data Fusion.**

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

MOBILITÄT & VERKEHR

Prof. Dr. rer. nat. Anja Katharina Huemer

Wahrgenommene Bedürfnisbefriedigung durch Verkehrsmittel: Validierung der PMNS-Skala und Vorhersage von Nutzung und Zahlungsbereitschaft

Stefan Bohmann, Eva Maria Kastl, Anja Katharina Huemer

I. Forschungsschwerpunkt

Mobilitätsentscheidungen sind nicht ausschließlich als Ergebnis eines Kosten-Nutzen-Kalküls zu verstehen (z. B. Zeitaufwand, monetäre Kosten, Erreichbarkeit). Vielmehr können Individuen, im Sinne des Campbell-Paradigmas, Kostenunterschiede durch Motivation überbrücken: Höhere Motivation geht mit einer größeren Bereitschaft einher, zeitliche oder monetäre Aufwände zu tragen, sodass auch "teure" Optionen gewählt werden [1,2].

Aus einer Need-Satisfaction-Perspektive speist sich Motivation dabei wesentlich aus der Erfüllung psychologischer Bedürfnisse [3,4]. Die Perceived Mobility Need Satisfaction (PMNS)-Skala [5] operationalisiert diese Perspektive für den Mobilitätskontext: Mit 20 Items erfasst sie die verkehrsmittelspezifische Erfüllung von Autonomie, Kompetenz, Verbundenheit, Sicherheit, finanziellen Aspekten, physischem Komfort und Vergnügen. Dadurch lässt sich empirisch prüfen, inwiefern Unterschiede in der Bedürfnisbefriedigung zwischen Modi mit Nutzungsindikatoren und Zahlungsbereitschaft für Mobilitätsangebote zusammenhängen.

Die vorliegende Arbeit liefert eine erstmalige psychometrische Untersuchung der PMNS in einem Mehr-Verkehrsmittel-Design und prüft zugleich ihre prädiktive Validität für (a) Indikatoren der Verkehrsmittelnutzung sowie (b) einen Zahlungsindikator im Kontext eines konkreten, potenziellen Mobilitätsangebots (RadlService: kostenlose Werkzeugbereitstellung, Reparaturservice zu fairen Preisen, An- und Verkauf von Rädern).

II. Vorgehensweise

Die Analysen basieren auf einer Online-Befragung am Campus der Universität der Bundeswehr München (N = 369). Erhoben wurden retrospektive Nutzungsindikatoren der vergangenen Woche (kumulative Nutzungsdauer, Distanz, Häufigkeit) für Zufußgehen, Fahrrad, öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), Pkw sowie MORE-Sharing**,** ergänzt, um die PMNS-Bewertungen, die für jedes Verkehrsmittel separat beantwortet wurden. Als Zahlungsindikator wurde die dichotome Bereitschaft zur finanziellen Beteiligung am RadlService erfasst (kostenlose Werkzeugbereitstellung, Reparaturservice zu fairen Preisen sowie An- und Verkauf von Fahrrädern).

III. Ergebnisse 2025

Zur psychometrischen Prüfung der PMNS wurden konfirmatorische Faktorenanalysen durchgeführt; ergänzend wurden Intraklassenkorrelationen (ICC) als Indikator personenbezogener Abhängigkeiten herangezogen. Für Autonomie, Kompetenz und finanzielle Aspekte fielen die ICC sehr gering aus (.002 - .071), was nur minimale personenspezifische Varianzanteile nahelegt und ein konventionelles CFA-Modell rechtfertigt [6]. Nach theoriegeleiteter Re-Spezifikation zeigte dieses Modell einen guten Fit ($\chi^2(32)=145.06$; Robust-CFI=.984; Robust-TLI=.977; SRMR=.027; Robust-RMSEA=.066; Abbildung 1).

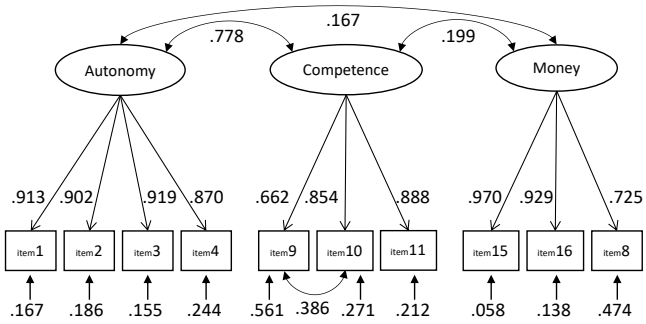


Abbildung 1: CFA- Messmodell

Sicherheit und physischer Komfort weisen dagegen substanzielle ICC auf (.136–.309); entsprechend wurde eine zweifaktorielle Mehrebenen-CFA geschätzt, um personenspezifische (between) und verkehrsmittelspezifische (within) Varianzanteile getrennt zu modellieren. Die Gleichsetzung der unstandardisierten Faktorladungen legt Within- und Between-Ebene auf dieselbe Messmetrik, sodass beide Ebenen als dieselben Bedürfnisdimensionen interpretierbar sind: Within reflektiert die modusbezogene Bedürfnisbefriedigung, Between das personenbezogene Anspruchsniveau über die innerhalb einer Person bewerteten Modi [7,8]. Der Modellfit war akzeptabel bis gut ($\chi^2(12)=62.21$; Robust-CFI=.978; Robust-TLI=.963; SRMR_within=.033; SRMR_between=.081; RMSEA=.073; Abbildung 2) und war gegenüber einem Modell mit frei geschätzten Ladungen über beide Ebenen signifikant, aber vernachlässigbar schlechter ($\Delta\chi^2(3)=8.49$, p=.037).

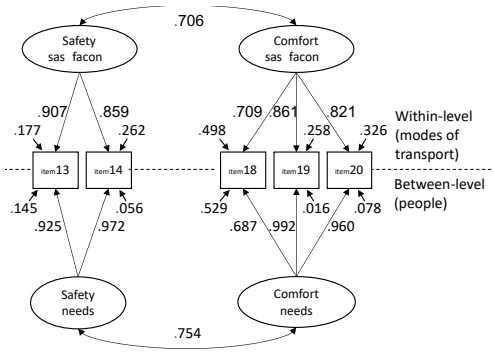


Abbildung 2: Mehrebenen CFA-Messmodell

Die in den (Mehrebenen-)CFA-Modellen geschätzten Faktorscores wurden anschließend als Prädiktoren in linearen Regressionsmodellen (Nutzungsmaße) bzw. logistischer Regression (Zahlungsbereitschaft) verwendet.

Zur Vorhersage der kumulativen Nutzungsdistanz wurde zunächst ein Basismodell geschätzt, das die Distanz ausschließlich durch das jeweilige Verkehrsmittel erklärt ($F(4,626)=24.12$, $p<.001$, $R^2=.128$). Das erweiterte Modell mit den Interaktionen Verkehrsmittel × Sicherheit und Verkehrsmittel × Autonomie verbesserte die Varianzaufklärung ($F(14,616)=9.69$, $p<.001$, $R^2=.162$).

Die prädiktiven Effekte sind dabei nicht verkehrsmittelinvariant: Einzelne Bedürfnisdimensionen werden nur für spezifische Verkehrsmittel relevant. Konkret war Autonomiebefriedigung ausschließlich für den ÖPNV prädiktiv, d. h. höhere Autonomiebefriedigung ging mit einer größeren zurückgelegten ÖPNV-Distanz einher (Interaktion ÖPNV × Autonomie: $B=76.05$, $p=.042$). Für Sicherheit zeigte sich kein robuster, verkehrsmittelübergreifender Effekt; für den Pkw ergab sich jedoch ein trendmäßiger Zusammenhang (Interaktion Pkw × Sicherheit: $B=68.11$, $p=.073$), der auf eine potenziell höhere Pkw-Distanz bei höherer Sicherheitsbefriedigung hindeutet.

Die dichotome Bereitschaft zur finanziellen Beteiligung am RadlService (kostenlose Werkzeugbereitstellung, Reparaturservice zu fairen Preisen, An- und Verkauf von Fahrrädern) wurde durch ein Modell mit physischem Komfort, Nutzungshäufigkeit und deren Interaktion vorhergesagt. Das Gesamtmodell war signifikant ($\chi^2(3)=37.34$, $p<.001$) und wies eine geringe bis moderate erklärte Varianz auf (McFadden's $R^2=.087$). Physischer Komfort sagte die Zahlungsbereitschaft deutlich vorher ($B=0.800$, $OR=2.226$, 95% CI [1.288; 3.846], $p=.004$), während Nutzungshäufigkeit als Haupteffekt nicht signifikant war ($B=-0.126$, $OR=0.882$, $p=.640$). Die Interaktion Komfort × Häufigkeit war signifikant ($B=1.046$, $OR=2.846$, 95% CI [1.150; 7.042], $p=.024$), was darauf hindeutet, dass der Zusammenhang zwischen Komfort und Zahlungsbereitschaft mit der Nutzungshäufigkeit zunimmt. Die Zahlungsbereitschaft lässt sich nicht hinreichend aus reinen Nutzungsmaßen ableiten; sie wird substanziell durch Bedürfnisindikatoren, hier insbesondere Komfort, mitbestimmt.

Die vorliegenden Ergebnisse sprechen dafür, dass die PMNS zentrale Dimensionen verkehrsmittelspezifischer Bedürfnisbefriedigung im Mehr-Verkehrsmittel-Setting psychometrisch tragfähig abbildet und damit als Grundlage für prädiktive Analysen geeignet ist. Minimale Anpassungen der Faktorenstruktur sollten in zukünftigen Versionen systematisch geprüft und konsolidiert werden. Insbesondere für die Zahlungsbereitschaft (RadlService) liefert die PMNS einen klaren Zusatznutzen gegenüber reinen Nutzungsindikatoren: Während Distanz und Häufigkeit allein keine belastbare Vorhersage ermöglichen, ist die verkehrsmittelspezifische Bedürfnisbefriedigung, getrennt von personenstabilen Anspruchsniveaus, signifikant mit Zahlungsbereitschaft assoziiert. Damit unterstreicht die Studie den Wert einer Bedürfnisbefriedigungs-Perspektive für die Evaluation und Gestaltung von Mobilitätsangeboten, weil sie motivationale Qualität und Akzeptanzpotenziale adressiert, die über reine Nutzungskennwerte hinausgehen.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Die in den Arbeitspaketen vorgesehene Primärdatenerhebung kann aus administrativen Gründen an der Universität derzeit nicht umgesetzt werden. Die Fragestellungen werden daher alternativ anhand belastbarer öffentlicher Datensätze (z. B. *Mobilität in Deutschland* 2023, MID) bearbeitet. Darüber hinaus wird in Kooperation mit der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) ein Fragebogen zur Erfassung der subjektiven Sicherheit Radfahrender zur Infrastrukturbewertung entwickelt; die Veröffentlichung ist für 2026 vorgesehen.

V. Literaturverzeichnis

[1] F. G. Kaiser, K. Byrka und T. Hartig, "Reviving Campbell's paradigm for attitude research," *Personality and Social Psychology Review*, Bd. 14, Nr. 4, S. 351–367, 2010, doi: 10.1177/1088868310366452.

[2] O. Taube, A. Kibbe, M. Vetter, M. Adler und F. G. Kaiser, "Applying the Campbell Paradigm to sustainable travel behavior: Compensatory effects of environmental attitude and the transportation environment," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Bd. 56, S. 392–407, 2018.

[3] R. M. Ryan und E. L. Deci, "Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being," *American Psychologist*, Bd. 55, Nr. 1, S. 68–78, 2000, doi: 10.1037/0003-066X.55.1.68.

[4] K. M. Sheldon, A. J. Elliot, Y. Kim und T. Kasser, "What is satisfying about satisfying events? Testing 10 candidate psychological needs," *Journal of Personality and Social Psychology*, Bd. 80, Nr. 2, S. 325–339, 2001, doi: 10.1037/0022-3514.80.2.325.

[5] T. Schrills, M. Gruner, M. Sieger und T. Franke, "Perceived Mobility Need Satisfaction (PMNS) Scale – german," OSF/PsyArXiv (Preprint), 2024, doi: 10.31234/osf.io/w84yq.

[6] J. J. Hox, "Multilevel regression and multilevel structural equation modeling," in *The Oxford Handbook of Quantitative Methods in Psychology, Vol. 2: Statistical Analysis*, T. D. Little (Hrsg.), Oxford: Oxford University Press, 2013.

[7] L. M. Stapleton, J. S. Yang und G. R. Hancock, "Construct meaning in multilevel settings," *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, Bd. 41, Nr. 5, S. 481–520, 2016, doi: 10.3102/1076998616646200.

[8] S. Jak, "Cross-level invariance in multilevel factor models," *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, Bd. 26, Nr. 4, S. 607–622, 2019, doi: 10.1080/10705511.2018.1534205.

***Kurzbiographie Autor* — Stefan Bohmann studierte Psychologie (B.Sc.) an der TU Braunschweig und absolvierte den M.Sc. Psychologie an der OVGU Magdeburg mit Schwerpunkt Kognitive Neurowissenschaften. Seit Dezember 2024 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität der Bundeswehr München im Projekt MORE. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Ingenieur- und Verkehrspsychologie, Psychometrie sowie statistischer Modellierung.**

Sicherheit von Radfahrenden an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten – Vorbereitung von Experimenten in Fahr -und Fahrradsimulator

Markus Strigel, Anja Katharina Huemer

I. Forschungsschwerpunkt

Im Forschungsschwerpunkt Experimentelle Infrastruktur werden Konzepte zur Verbesserung von Verkehrsinfrastrukturen entwickelt, die für einen multimodalen Verkehr geeignet sind. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Entwicklung fahrradfreundlicher Infrastrukturen, die einen Wechsel vom motorisierten Individualverkehr zum Fahrrad als umweltfreundlichere und gesundheitsförderliche Alternative unterstützen.

Verkehrsknotenpunkte weisen ein hohes Gefahrenpotenzial für Radfahrende auf. Die durchgeführte Literaturrecherche zeigt, dass weiterhin ein erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich dessen Überprüfung und Bewertung besteht. In einschlägigen Regelwerken, wie der Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen (RASt) [1] und den Empfehlungen für Radverkehrsanlagen (ERA) [2], werden für die Gestaltung von Verkehrsinfrastruktur Maßintervalle vorgegeben, deren Anwendung zu unterschiedlichen sicherheitsrelevanten Ergebnissen führen kann. Gleichzeitig variiert die konkrete Ausgestaltung von Knotenpunkten international erheblich, was die Frage aufwirft, welche Gestaltungsansätze ein hohes Sicherheitsniveau für Radfahrende gewährleisten und zugleich einen flüssigen Verkehrsablauf ermöglichen. Vor diesem Hintergrund kommt Lichtsignalanlagen eine zentrale Rolle in der Gestaltung und Steuerung von Verkehrsknotenpunkten zu. Die Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) [3] bilden zwar den aktuellen Stand der Praxis ab, weisen jedoch ebenfalls Weiterentwicklungsbedarf auf, insbesondere im Hinblick auf die spezifischen Anforderungen des Radverkehrs. In Ländern wie Niederlande, mit einer ausgeprägten Radverkehrskultur, existieren bereits innovative und vielversprechende Gestaltungs- und Steuerungskonzepte, die als potenzielle Referenz und zukünftige Lösungsansätze für die Weiterentwicklung der Infrastruktur in Deutschland dienen können.

II. Vorgehensweise

Das Arbeitspaket wurde vor Abschluss der ersten Untersuchung neu zugeordnet und in der Folge inhaltlich überarbeitet. Entsprechend lag der Schwerpunkt seitdem 01.09.2025 auf der systematischen Aufarbeitung der relevanten Literatur, der methodischen Neuausrichtung sowie der Entwicklung der Simulationsumgebung, in der die erste Untersuchung durchgeführt wird. Die Simulation wurde mit der Software SILAB® 7.3 erstellt [4]. Diese Untersuchung zielt auf die Analyse und Bewertung bestehender Verkehrsinfrastrukturkonzepte ab. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen ist vorgesehen, in nachfolgenden Untersuchungen entweder bestehende Konzepte gezielt weiterzuentwickeln oder neue experimentelle Infrastrukturlösungen zu konzipieren und zu evaluieren

III. Ergebnisse 2025

Für die anstehende Untersuchung wurden das methodische Design sowie die Erhebungsmethodik festgelegt. Die Verkehrsinfrastruktur wird zwischen einer gleichrangigen Haltelinie, einer vorgezogenen Haltelinie sowie einer vorgezogenen Aufstellfläche (Bikebox) für den Radverkehr variiert. Zusätzlich wird die Lichtsignalsteuerung zwischen gleichgeschalteten Grünphasen, einer um fünf Sekunden vorgezogenen Grünfreigabe sowie einer separaten Grünphase für den Radverkehr variiert. Jede Variantenkombination wird jeweils aus der Perspektive einer radfahrenden sowie einer Pkw-fahrenden Person durchgeführt. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, wurde hierfür ein simulationsbasiertes Szenario entwickelt, das den häufig auftretenden Unfalltyp 232 [5] an Knotenpunkten simuliert. Dabei entsteht ein möglicher Konflikt zwischen einer geradeaus radfahrenden Person und einem rechtsabbiegenden Lkw. Je nach Perspektive übernimmt die teilnehmende Person entweder die Rolle der Radfahrenden oder der Pkw-fahrenden Person, wodurch das Interaktionsgeschehen aus beiden Sichtweisen analysiert werden kann.



Abbildung 1: Visualisierung des Untersuchungsszenarios (SILAB® 7.3)

Die subjektive Sicherheit wird anhand des neu entwickelten Fragebogens SuSi & Ko gemessen. Erstellt erstmals ein valides und reliables Messinstrument zur Bewertung der subjektiven Sicherheit von Radverkehrsinfrastrukturen bzw. Verkehrssituationen aus der Perspektive der Radfahrenden dar. In Kombination mit der präzisen Erhebung von Verkehrskonfliktmaßen bzw. Surrogate Safety Measures (SSM) als Indikator der objektiven Sicherheit in Simulationsumgebungen besteht die Möglichkeit, ein fundiertes Abbild der Sicherheit der realen Welt zu entwerfen. Als SSM werden Time to Collision (TTC), Post-Encroachment Time (PET), Delta-V und Jerk

verwendet. TTC beschreibt die Zeit bis zu einer Kollision, sofern beide Verkehrsteilnehmenden ihre aktuelle Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung beibehalten [6]. PET beschreibt die Zeitspanne zwischen dem Verlassen eines Konfliktpunkts durch die zuerst eintreffende Person und dem Eintreffen der zweiten Person [6]. Delta-V beschreibt die Geschwindigkeitsänderung, die bei einer hypothetischen Kollision aufträte, und dient als Indikator für die potenzielle Verletzungsschwere [7]. Jerk bezeichnet die zeitliche Änderung der Beschleunigung und erfasst die Abruptheit von Brems- oder Ausweichmanövern als Maß für die Intensität der Anpassungshandlung [8].

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Im ersten Quartal 2026 wird die erste Studie des Arbeitspakets in einer Simulationsumgebung gestartet. Hierbei werden international etablierte Infrastrukturen und Lichtsignalanlagen untersucht. Folgend auf die Auswertung der Daten, wird die Forschung publiziert. Als nächsten Schritt soll eine weitere Untersuchung folgen, die auf dem Wissen der ersten Untersuchung aufbaut. Dabei werden iterativ überarbeitete Konzepte sowie neue experimentelle Infrastruktur -und Lichtsignalsteuerungsideen untersucht

V. Literaturverzeichnis

[1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hrsg., *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen: RASt 06*, Ausg. 2006, korr. Nachdr. Mai 2012. in FGSV, no. 200. Köln: FGSV-Verl, 2012.

[2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hrsg., *Empfehlungen für Radverkehrsanlagen: ERA*, Ausg. 2010. in FGSV R2, no. 284. Köln: FGSV-Verl, 2010.

[3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, und Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, *Richtlinien für Lichtsignalanlagen: RiLSA: Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr*, Ausgabe 2015. in FGSV, no. 321. Köln: FGSV Verlag GmbH, 2015.

[4] Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH (2025). SILAB Version 7.3. Veitshöchheim, 2025.

[5] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV), Unfallforschung der Versicherer (UDV) Hrsg., Unfalltypen-Katalog - Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltyps. Berlin, 2016

[6] C. Johnsson, A. Laureshyn, und T. De Ceunynck, „In search of surrogate safety indicators for vulnerable road users: a review of surrogate safety indicators“, *Transport Reviews*, Bd. 38, Nr. 6, S. 765–785, Nov. 2018, doi: 10.1080/01441647.2018.1442888.

[7] A. Laureshyn, T. De Ceunynck, C. Karlsson, Å. Svensson, und S. Daniels, „In search of the severity dimension of traffic events: Extended Delta-V as a traffic conflict indicator“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 98, S. 46–56, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.aap.2016.09.026.

[8] A. Laureshyn, Å. Svensson, und C. Hydén, „Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 42, Nr. 6, S. 1637–1646, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.aap.2010.03.021.

***Kurzbiographie Autor* — Markus Strigel arbeitet seit dem 01.09.2025 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität der Bundeswehr München am Lehrstuhl für Verkehrspsychologie. Er absolvierte sein Bachelorstudium in Ingenieurpsychologie sowie das Masterstudium in Human Factors an der Hochschule Furtwangen.**

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

MOBILITÄT & VERKEHR

Prof. Dr.-Ing. Christian Jacoby

Advancing Urban Mobility Through Design Research: A Case Study on Applying Adaptive Curbside Management in a Space-Constrained Street Environment.

Markus Holzmair, Dipl.-Ing. Architect BYAK

I. Research Focus

Adaptive Dynamic Curbside Management (ADCM) [1] advances traditional urban planning by utilizing autonomous technologies and modular components (pallet modules) to reconfigure street spaces in real time. While the core theory explores demand-driven, fully autonomous street environments, in 2025 our research focused on translating these principles into feasible, "regulation-ready" applications.



Fig. 1: Dynamic configuration variants of the street space using the example of Marine Drive in West Vancouver, Canada (own illustration 2025)

Using Fraunhoferstraße in Munich as a case study [2]stre , an arterial road with fixed tram infrastructure, high multimodal demand, and recent controversial design interventions [3], the focus in 2025 was on developing a practical, non-robotic design solution that integrates key elements of ADCM within the realm of existing regulations. Fraunhoferstraße serves as an ideal precedent for spatially constrained challenges in urban mobility, yet current conditions are not favorable due to frequent traffic congestion, lack of shading, limited parking and loading zones, and a total absence of vegetation, leading to overall public disagreement with the current situation.

This study explores how key ADCM principles can be selectively applied through a practical, regulation-compliant design intervention to improve functionality, safety, and urban livability in a spatially constrained urban street environment.

II. Approach / Methodology

Public engagement is an essential component of this research. It provides real-time, VR-user input that is used to adjust, refine, and validate the proposed urban interventions and design proposals. To validate these proposals' effectiveness, a mobile VR booth and exhibition center are deployed on-site at the location of the proposed changes. This allows residents, local business owners, cyclists, and public transit users to experience a simulated VR transformation of Fraunhoferstraße before its implementation in the real world.

The primary research questions were: (1) Do users feel safe and comfortable riding and walking next to trams in the proposed layout?, and (2) Does the new configuration improve the street's overall usability for all stakeholders and improve quality of life? Initial prototypes are developed using a research-through-design approach. This approach started with a focused sample of mobility and design experts to enable rapid iteration. Insights from this expert group will guide the refinement of the prototype for broader testing. The second phase, will target participants from a diverse group of stakeholders, including residents, commuters, shop owners, cyclists, and professionals such as emergency responders and tram operators.

First, participants explore a high-fidelity digital twin of Fraunhoferstraße to ensure spatial awareness and accurate perception of existing conditions. Then, a gradual transition effect shifts the environment to the proposed redesign, where adaptive curbside modules create a dedicated cycling and tram lane with dynamic spatial separation. While still in VR, participants complete an embedded survey to provide immediate feedback on spatial usability, perceived attractiveness, wayfinding, comfort, and safety. Post-VR, additional qualitative insights are collected through open-ended questions and discussion, capturing stakeholder perspectives on confidence, maneuverability, and the perceived impact of adaptive curbside strategies.

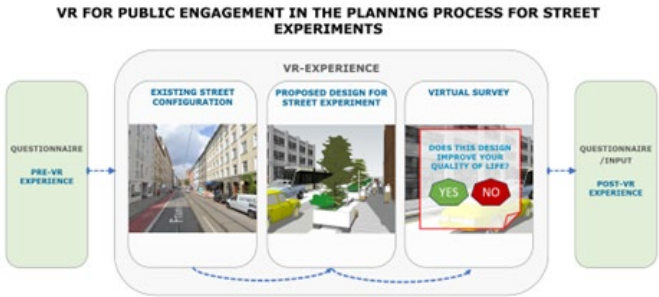


Fig. 2: VR Test plan for public engagement [2]

To complement subjective feedback, objective behavioural data is collected through eye-tracking and positional sensor analysis, measuring gaze direction, reaction times, and navigation patterns to assess user behaviour in proximity to trams, user hesitation in navigating the reconfigured street, and the effectiveness of spatial separation in reducing conflict points.

III. Results 2025

Shared Flex Space (Fraunhoferstraße Case Study)

To create a safe, regulation-compliant corridor for trams and cyclists within a constrained right-of-way, the risk of

bicycle tires getting caught in tram tracks can be reduced by installing crossable rubber track inserts. These inserts create an even cycling surface and compress under tram wheel loads. Building on these technical measures, the proposed intervention introduces a protected, dynamic hybrid lane for trams and cyclists, maximizing space efficiency and improving public transit reliability during congestion.

To improve user comfort and perceived safety, tram speeds within the corridor are limited (e.g., to match average cycling speeds), and the corridor is designed as a physically separated, two-way space with clear spatial cues. Additionally, Pallet Modules (PMs) are introduced along the hybrid corridor to serve as safety buffers for cyclists and pedestrians and to provide a foundation for urban greenery, seating, and shading elements. This reallocation improves livability by reducing heat buildup, improving microclimate conditions, and creating a quieter, more comfortable pedestrian environment while aligning with the current regulatory and planning framework.



Fig. 3: Illustration of Current Lane arrangement (trams and traffic share lanes, causing congestion) compared to the proposed design (protected mobility, bidirectional hybrid tram/cyclist lane) [2]

As illustrated in Fig.3, due to physical space limitations, two trams cannot pass each other simultaneously within the constrained segment. Therefore, a dynamic tram flow system is introduced that enables alternating tram movements through the hybrid corridor during traffic jams, while maintaining enough clearance for cyclists to travel safely in both directions. The operational concept includes dynamic tram route selection based on traffic conditions, supported by sensors monitoring traffic flow and tram-operator-controlled switching before entering the constrained Fraunhoferstraße section.

When there are no delays, trams continue using the standard alignment, while the dynamic hybrid corridor supports bypass operation when traffic congestion otherwise would block normal tram movement. Beyond improving tram reliability , this configuration also allows for reconfigurations, as Modules can be repositioned by manned forklifts for events, maintenance, or emergency access. Preliminary VR testing with a small, select user group indicates improved quality of life and safety perception.



Fig. 4: Illustration of the proposed hybrid lane for dual use of cyclists and trams traveling north and southbound (own illustration 2025)

PCT Patent & Startup Development (Dual-Use)

The international PCT patent application [4] reached a critical milestone in 2025. The European Patent Office (EPO) accepted 17 out of 19 claims as novel and inventive.

Dual-Use: Another major milestone of 2025 was the application of ADCM modules for civil defense. Designed as "dual-use" infrastructure, these modules can act as urban furniture during peace times but can be rapidly reconfigured as adaptive, mobile barricades in conflict zones (e.g., Ukraine). This opens markets in Poland, Finland, and the Baltic states.

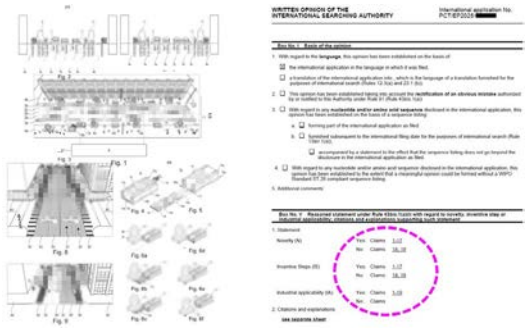


Fig. 5: Excerpt of the PCT patent application (images omitted) and the EPO International Search Report [4]

District of North Vancouver Pilot-Project(DNV): A partnership was established with Kevin Sang of the DNV for an ADCM pilot-intervention experiment on Pemberton Avenue to test scheduled reconfigurations using district-owned modular planters to evaluate user adaptation.

New Patent – Unsignalized Intersection: Preparation began for a second patent: a compact, unsignalized intersection for rural and urban applications. The geometry is designed to naturally reduce vehicle speeds and eliminate conflict points, providing a low-cost, high-safety alternative to signalized crossings.

IV. Outlook & Next Steps for2026

Full Analysis: Finalizing the Fraunhoferstraße VR test runs using the now-available Cognitive3D pipeline.

IP Finalization: Submitting responses for the remaining two patent claims and officially filing the second intersection patent.

DNV Implementation: Moving the Pemberton Avenue pilot from simulation to physical deployment, focusing on funding and permit acquisition.

V. References

VI. References

[1] M. Holzmair, "Dynamic and Autonomous Curbside Management—Design Research in Virtual Reality for Future Adaptive Street Spaces," in *XR and Metaverse* (Springer Proceedings in Business and Economics), T. Jung, M. C. tom Dieck, S. C. Jeong, S.-H. Kim, D. Sahl, and S. J. Kim, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 497–509.

[2] M. Holzmair, "Advancing Urban Mobility Through Design Research: A Case Study on Applying Adaptive Curbside Management in a Space-Constrained Street Environment," in *2025 Smart City Symposium Prague (SCSP)*, Prague, Czech Republic, May. 2025 - May.

2025, pp. 1–7, doi: 10.1109/SCSP65598.2025.11037693.
[3] "München: Streit um Radspuren in der Fraunhoferstraße - München - SZ.de." Accessed: Feb. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.sueddeutsche.de/muenchen/muenchen-fraunhoferstrasse-radspuren-radverkehr-1.4538215
[4] Markus Holzmair, “dynamic curbside management system and method for a flexible real-time adaptation of a road space to different traffic situations or desired policies,” PCT/EP2025/05----.

***Professional Profile*— Markus Holzmair, Dipl.-Ing. Architect, studied architecture at the Technical University of Munich, the University of British Columbia, and the University of Illinois.**

Since 2011, he has practiced as an architect in Vancouver, specializing in residential high-rises, mass timber construction, and urban design. During this time, he also completed independent projects in Germany and focused extensively on the integration of VR technologies. Since 2019, he has been a registered architect with the Bavarian Chamber of Architects, later joining the MORE team as a Research Associate at the University of the Bundeswehr Munich in 2021.

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

ENERGIE & ANTRIEB

Prof. Dr.-Ing. Christian Trapp

Detailed physics-based spark and ignition model for alternative fuels such as hydrogen

Ahmad Anas Alkezbari

I. Forschungsschwerpunkt

The research focuses on the development and validation of a physics-based spark and ignition modeling approach for spark-ignited engines operating with alternative fuels, particularly hydrogen. The work combines high-resolution optical diagnostics with three-dimensional CFD simulations to improve the physical representation of spark discharge, plasma–flow interaction, heat transfer, and early flame kernel formation. A strong emphasis is placed on ignition processes under engine-relevant flow and pressure conditions, as well as on applications to advanced ignition concepts such as passive prechambers, where accurate ignition modeling is critical for reliable combustion prediction.

II. Vorgehensweise

The research starts with the standard physics-based ignition model CADIM and focuses on its systematic optimization toward the enhanced CADIM-VM-TWP approach. The extended model improves the representation of spark motion, plasma–flow interaction, and heat transfer to the surrounding mixture and was implemented in AVL FIRE M using a user-defined function (UDF). Validation was performed using a dedicated wind-tunnel spark test bench through detailed comparisons of simulated and measured spark behavior. The optimized ignition model was subsequently applied to hydrogen engine simulations, including passive prechamber configurations, and validated against engine test bench results such as pressure trace comparisons.

III. Ergebnisse 2025

In 2025, the optimized ignition model was successfully validated in a hydrogen passive prechamber engine configuration. After calibrating the breakdown voltage in the simulation, a very good agreement between numerical and experimental results was achieved (Figure 1). The improved model enabled a more accurate prediction of spark initiation and ignition timing, which led to a close match between simulated and measured in-cylinder pressure traces. These results demonstrate the improved reliability of the ignition modeling approach for hydrogen engine simulations.

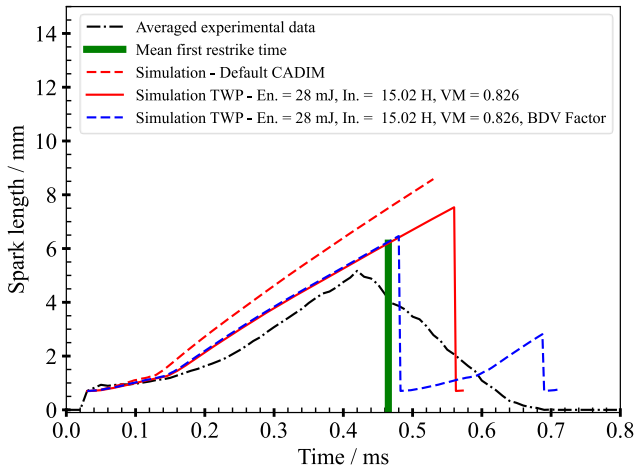


Figure 1: Simulated and measured spark length over time after breakdown voltage calibration. Source: Image generated by Ahmad Alkezbari (UniBw M); simulation results from UniBw M (Ahmad Alkezbari); experimental results from Esslingen University of Applied Sciences (Prof. Gregor Rottenkolber and Saraschandran Kottakalam).

The newly developed CADIM-VM-TWP ignition model was applied to simulate the ignition process in hydrogen engine configurations, including spark movement and heat transfer from plasma to the surrounding mixture. Based on the local temperature, pressure, and equivalence ratio, the coupled chemical kinetics initiate the first flame kernel once auto-ignition conditions are reached. This allows the spatial and temporal evolution of the spark channel and early flame kernel formation to be resolved directly within the CFD framework, as illustrated in Figure 2.

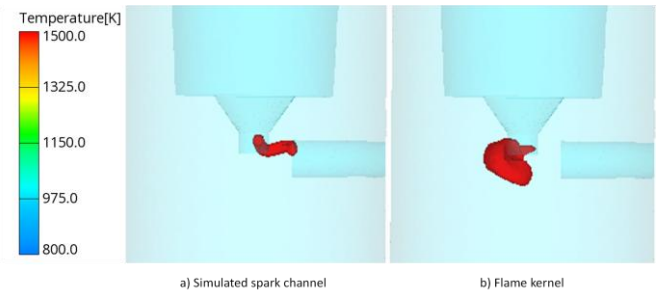


Figure 2: Simulated spark channel movement and flame kernel formation immediately following a restrike. Source: [2]

In addition to the spark-length validation, the improved ignition model was evaluated at engine scale by comparing simulated and measured in-cylinder pressure traces. The pressure trace corresponds to an asymmetric prechamber configuration proposed based on CFD simulations, which demonstrated improved combustion behavior. After applying

the optimized ignition model, the simulation reproduced the pressure rise and combustion phasing observed in the engine test bench with good accuracy (Figure 3). The close agreement confirms that the improved ignition modeling approach provides a reliable basis for predicting combustion initiation and early pressure development in hydrogen passive prechamber engine configurations.

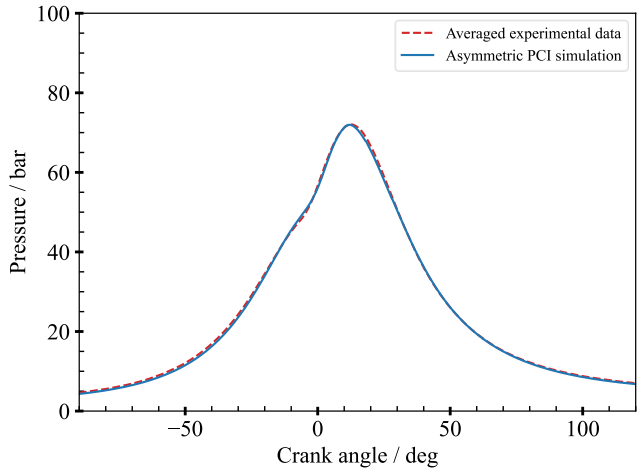


Figure 3: Comparison of simulated and measured in-cylinder pressure traces for a hydrogen passive prechamber engine with an asymmetric prechamber design, demonstrating good agreement after ignition model optimization. Source: [2]

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Future work will focus on further improving the CADIM-VM-TWP ignition model, with particular emphasis on refining the spark re-strike criterion to better representspark sustainability under engine-relevant conditions. The optimized ignition model will be applied to extended hydrogen engine operating points and advanced prechamber designs. In addition, a coupled CFD–FEA approach will be developed to analyze thermal behavior of the prechamber and spark plug under firing conditions. This coupling will be validated using temperature measurements from thermal probes, enabling a more accurate assessment of thermal loading, durability, and ignition robustness.

V. Literaturverzeichnis

[1] S. Kottakalam, A. A. Alkezbari, G. Rottenkolber, and C. Trapp, “Optical investigation of sparks to improve ignition simulation models in spark-ignition engines,” Energies, vol. 17, no. 18, Art. no. 4640, 2024, doi: 10.3390/en17184640.

[2] C. Trapp, V. Joshi, A. A. Alkezbari, G. Rottenkolber, S. Kottakalam, and M. Nenzel, “Methodology for the development of passive prechamber spark plugs for use in ultra-lean light-duty hydrogen engines,” in Proc. 20th Symp. Sustainable Mobility, Transport and Power Generation, Graz, Austria, Sep. 2025.

***Kurzbiographie Autor* — Ahmad Anas Alkezbari is a research associate and CFD computational engineer at the University of the Bundeswehr Munich, where he is pursuing his PhD in the field of physics-based spark ignition modeling. His research focuses on the numerical investigation and implementation of ignition models for spark-ignited engines, with particular emphasis on hydrogen and passive prechamber applications. Experimental measurement data from collaborative studies are used to validate the numerical simulations. He holds a Master’s degree in Computational Mechanics from the University of Duisburg-Essen, with a focus on fluid dynamics and CFD methods. His work has been disseminated through a peer-reviewed journal publication and conference contributions.**

Architecture and Close Loop Development of Smart Energy Management System

M.Sc. Anshu Ashokkumar Bhagat

Abstract -. The transition toward decentralised, renewable-based energy systems requires intelligent and adaptive Energy Management Systems (EMS) capable of coordinating heterogeneous energy components under dynamic operating conditions. This report presents the progress achieved in 2025, focusing on the development and validation of a closed-loop EMS architecture. Building upon the integration and experimental groundwork established in 2024, the 2025 work emphasises real-time data exchange, simulation-based optimisation, and iterative feedback control between physical energy components and a digital optimisation environment. The implemented EMS enables continuous monitoring, optimisation, and execution of energy flows using standardised communication interfaces and real-time telemetry. [1]

I. Research Focus

The primary research focus in 2025 is the advancement of the Energy Management System from a centrally monitored control platform to a fully adaptive, closed-loop energy management framework. The EMS is designed to coordinate diverse energy components, including photovoltaic generation, battery energy storage systems, combined heat and power units, fuel cells, hydrogen infrastructure, grid interaction, and electrical loads.

A central objective is the development of a real-time feedback mechanism that enables the EMS to continuously observe the operational state of the system, communicate this information to an optimisation environment, and execute optimised operating strategies on the physical system. This approach addresses the increasing need for dynamic adaptability in energy systems subject to fluctuating demand profiles, intermittent renewable generation, and varying operational constraints.[2]

Additionally, the research focuses on scalability, interoperability, and robustness of the EMS architecture, ensuring compatibility with current and future energy technologies while maintaining reliable operation in both civilian and military application contexts.

II. State Of The Art Technology

Modern Energy Management Systems integrate multiple generation, storage, and conversion technologies into a unified supervisory framework. State-of-the-art EMS architectures rely on layered control concepts, where device-level communication is separated from supervisory optimisation and decision-making layers.[3]

In the context of hybrid microgrids, typical EMS implementations utilise industrial communication protocols such as Modbus TCP for deterministic device-level control, combined with higher-level interfaces such as REST APIs for schedule-based optimisation and system coordination. Lightweight telemetry protocols, such as MQTT, are increasingly employed to support low-latency, high-frequency data exchange between physical systems and digital services.[4]

Recent advancements also include the use of simulation-based optimisation, digital twins, and data-driven methods to improve system performance and resilience. These approaches enable continuous evaluation of system behaviour and support adaptive operating strategies that respond to real-time conditions rather than static pre-defined rules.

III. Approach And Results In 2025

In 2025, a Python-based integration framework was developed to act as a middleware between the EMS, the simulation-based optimisation tool, and the communication infrastructure. This framework interfaces with the EMS using Modbus TCP for device-level control, REST APIs for schedule exchange, and MQTT for real-time telemetry.

The EMS continuously collects operational data from all connected components, including power outputs, state-of-charge values, temperatures, voltages, currents, and operating modes. This data is aggregated and published via an MQTT broker, enabling fast and reliable dissemination of system state information while decoupling data producers from data consumers.

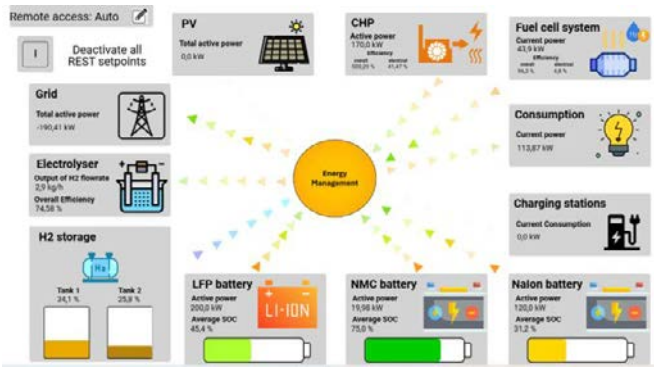


Figure-1: Overview of EMS / Source: EMS Web browser

The collected system state data is transmitted to a simulation-based optimisation tool, where the real energy system is

represented as a digital model incorporating component constraints, efficiencies, and demand profiles. Based on this information, the optimiser computes optimal operating schedules that satisfy demand requirements while respecting technical and operational constraints.[5]

The resulting schedules, including power setpoints and energy flow trajectories for individual components, are transferred back to the EMS through a REST interface. The EMS validates these schedules against real-time safety and availability constraints before translating them into device-specific control commands.

The EMS operates in a continuous closed-loop configuration. At fixed time intervals, updated measurements from the physical system are again forwarded to the optimisation layer, enabling periodic re-optimisation. This iterative feedback mechanism allows the system to adapt dynamically to changing operating conditions, such as load variations, renewable generation fluctuations, or component availability.

To support validation and analysis, all operational data is logged and visualised using a Grafana-based monitoring platform. The dashboard provides real-time insight into energy flows and component states, while historical data can be exported for offline analysis and performance evaluation. The results demonstrate consistent synchronisation between simulated and real system behaviour and validate the feasibility of closed-loop EMS operation.[6]

IV. Outlook And Next Steps For 2025 And 2026

The work carried out in 2025 represents a significant step toward adaptive and intelligent energy management. The implementation of a closed-loop data exchange and optimisation framework enables the EMS to respond dynamically to real-world conditions rather than relying on static operating strategies.

The use of MQTT for telemetry, REST for schedule exchange, and Modbus TCP for device control proved effective in balancing responsiveness, reliability, and system modularity. Experimental results indicate that the EMS can maintain energy balance, follow optimised schedules, and adapt to deviations between planned and actual system behaviour.

The focus for 2026 will be the transition from reactive optimisation to predictive and intelligence-driven energy management. Planned activities include the development of AI-based forecasting models for demand and renewable generation using historical EMS and simulation data. These forecasts will be integrated into the optimisation layer to enable anticipatory scheduling and improved system performance under uncertainty.

Furthermore, the digital representation of the energy system will be extended toward a full digital twin, enabling scenario-based testing and validation prior to real-world execution. These developments aim to further enhance the autonomy, robustness, and scalability of the EMS within the INES project.[7]

Acknowledgement

I would like to express my heartfelt gratitude to Prof. Dr.-Ing. Christian Trapp and M.Sc. Arjun Vijay for their positive support throughout the year. Their encouragement and belief in my abilities have been instrumental in helping me achieve my goals and ensuring my success. They continuously motivated me to push forward and achieve great results. Additionally, I am truly grateful to have had the opportunity to work with the entire team at UniBW. The experience has been invaluable for my personal growth, and I deeply appreciate the daily support and guidance I received from the team.

V. Bibliography

[1] S. E. Eyimaya and N. Altin, 'Review of Energy Management Systems in Microgrids', *Applied Sciences*, vol. 14, no. 3, p. 1249, Feb. 2024, doi: 10.3390/app14031249.

[2] 'microgrid'. Accessed: Jan. 14, 2026. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118720677

[3] 'Energy Archi'. Accessed: Jan. 14, 2026. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/6184305

[4] '9781118720677'. Accessed: Jan. 14, 2026. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118720677

[5] 'review of energy'. Accessed: Jan. 14, 2026. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/3/1249?utm_source=chatgpt.com

[6] 'advanced centalised energy'. Accessed: Jan. 14, 2026. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/6184305

[7] 'outlook energy'. Accessed: Jan. 14, 2026. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1422-0067/24/8/7457?utm_source=chatgpt.com

***Short Biography Author* — Anshu Bhagat is a research associate at UniBW München, where he has been contributing to advancements in Energy Management Systems (EMS) since January 2024. With a Master's degree in Power Engineering, his research focuses on developing innovative operating strategies for EMS to optimize energy utilization and promote sustainability. His work reflects a strong commitment to advancing renewable energy integration and efficient energy management for a sustainable future.**

Aufbau Demonstratorfahrzeug und prädiktive Betriebsstrategie für ein serielles Plug-in-Hybridantriebskonzept

Maximilian Böhme, M.Sc.

I. Forschungsschwerpunkt

Die Tätigkeit ist in zwei wesentliche Schwerpunkte untergliedert: Den Aufbau eines Demonstratorfahrzeugs für einen seriellen Hybridantriebsstrang sowie die simulative Entwicklung einer Betriebsstrategie für dieses Antriebskonzept. Grundlegend für beide Punkte wurden zu Beginn des Projekts zunächst die Anforderungen an das Gesamtfahrzeug definiert.

Übergeordnet wurde am Institut ein Rollenprüfstand mit EU7-kompatibler Abgasmesstechnik beschafft, um die Zielerfüllung aktueller und innovativer Antriebskonzept hinsichtlich Verbrauch, Fahrleistungen und Emissionen zu quantifizieren. Nach erfolgter Inbetriebnahme befinden sich die komplexen Anlagen im produktiven Forschungsbetrieb.

II. Vorgehensweise

Das vergangene Jahr war geprägt von der der Inbetriebnahme neu beschaffter Infrastruktur und Messtechnik, von Arbeiten am seriellen PHEV-Demonstratorfahrzeug und nicht zuletzt von weiterer simulativer Bearbeitung der prädiktiven Betriebsstrategie (PrOpS).

In Vorbereitung für AP2 „Laden beim Fahren“ sind bereits im Vorjahr Modifikationen am Fahrzeug vorgenommen werden, um Zugang zur HV-Leitung zwischen HVS und HEAT zu ermöglichen. Am System aus Generator und Inverter wird weiterhin mit hoher Intensität gearbeitet. Die hard- und insbesondere softwareseitige sowie sicherheitstechnische Verknüpfung des AVL E-Storage mit dem KS-Rollenprüfstand konnte im Lauf des Jahres abgeschlossen werden. Mit diesem System waren aufschlussreiche Untersuchungen zum Verhalten des Basisfahrzeugs möglich, wenn aus einer externen Stromquelle Leistung zugeführt wird.

Beim Projektpartner BMW haben sich interne Änderungen von Ansprechpartnern und Interessenslage dahingehend ergeben, dass ein Wechsel des Basismotors für den Vorkammer-ICE in Betracht gezogen, bewertet und schließlich entschieden wurde. Damit einhergehend wurde beschlossen, anstatt des U06 (2er Active Tourer) das Demonstratorfahrzeug auf einem U11 (X1) aufzubauen.

Die experimentelle Laserabsorptionsspektroskopie-Messtechnik von AIP für Ammoniak (NH_3) wurde, ebenfalls in Zusammenarbeit mit BMW, validiert und wird nunmehr im Rahmen der weiteren Kooperation für ein Projekt im Kontext aktueller Gesetzgebung für den chinesischen Markt genutzt.

Auf der simulativen Ebene wurde die zweistufige PrOpS im Wesentlichen finalisiert. Als Zusatz wurde ein *Reinforcement-Learning*-Agent in die Architektur integriert, mit dem Hintergedanken, die Kostenfaktoren des Zielfunktionals des MPC-Reglers während der Fahrt dynamisch anzupassen.

III. Ergebnisse 2025

In Zusammenarbeit mit KS wurde der AVL E-Storage in die Notauskette der Rollenprüfstandsautomatisierung integriert. In der Folge konnte die im Fahrzeug verbaute Junctionbox genutzt werden, um sukzessive steigende Leistungen aus der AVL PDU zuzuführen, welche das noch nicht fertiggestellte „Genset“ aus ICE und Generator simuliert. Vorbereitend wurde eine umfangreiche Risikoanalyse durchgeführt, um alle erdenklichen Versagensmodi der zu verändernden HV-Komponenten zu erfassen, hinsichtlich Eintrittswahrscheinlichkeit und zu erwartender Auswirkungen zu bewerten und mit Maßnahmen zu belegen.

In mehrwöchigen Versuchen auf dem Rollenprüfstand mit PDU wurde festgestellt, dass durch das Batteriemanagementsystem (BMS) des Fahrzeugs keinerlei Reaktion erfolgt, wenn bei moderatem Ladezustand bis zu 15 kW zugeführt werden. Bei Ladeleistungen von 20 kW und mehr kommt es sporadisch zu einer Fehlerkaskade, die im ungünstigsten Fall zu einer Öffnung der Hauptschütze während der Fahrt führt. Mangels detaillierter Dokumentation dieser Funktion ist eine tiefergehende Analyse bisher nicht möglich. Allerdings wurde mit großer Sicherheit festgestellt, dass es sich um eine Fehlreaktion infolge der veränderten Topologie des HV-Bordnetzes handelt und nicht um tatsächlich sicherheitskritische Ereignisse durch eine Verletzung von Systemgrenzen. Da bspw. im WLTC der durchschnittliche Leistungsbedarf unter 20 kW liegt, ist mit diesem niedrigsten ICE-Betriebspunkt unter gemäßigten Bedingungen ein ladungserhaltendes Fahren als SPHEV möglich. Für höhere Ladeleistungen sind weitere Informationen oder Zugriffsmöglichkeiten auf die BMU erforderlich.

Generator und Inverter wurden zur Inbetriebnahme zunächst auf einem Tischaufbau mit der PDU als Spannungsquelle, später im Labor des Lehrstuhls für elektrische Antriebe (EAA) auf einen Elektromotorenprüfstand aufgebaut. Ziel ist, die anvisierten ICE-Betriebspunkte bis 60 kW bei 3000 1/min anzufahren, während das System per CAN durch die dSpace MicroAutoBox (µAB) gesteuert wird. Während sich die Kühlung des Systems vergleichsweise einfach darstellt, wurden sowohl hinsichtlich der Kommunikation als auch der elektrischen Anbindung erhebliche weitere Entwicklungsbedarfe deutlich. Zum Aufbau der Kommunikation ist wegen einer fehlerhaften, mitgelieferten Softwarekonfiguration Unterstützung durch den Hersteller des Inverters nötig. Zudem werden bereits beim Prüfstandsbetrieb EMV-Probleme deutlich, die vor einem Verbau der Ladegruppe im Fahrzeug gelöst werden müssen.

Nach zeitintensiven Abstimmungen mit dem Projektpartner BMW wurde festgestellt, dass ein dauerhafter Verbleib des bisher genutzten U06 am Lehrstuhl aus vertraglichen Gründen nicht möglich ist. Stattdessen wird bis Ende der Projektlaufzeit,

mit Option auf Verlängerung ein BMW U11 PHEV (X1 30e) bereitgestellt. Dabei wurde deutlich, dass eine intensivere Zusammenarbeit zum Thema serielle Hybridantriebe gewünscht ist, aber anstelle des bisher als Basis angedachten B38K15-Motors nur auf Basis der aktuellen Motorengeneration (Bx8TÜ2) erfolgen kann. Um eine Übertragbarkeit auf andere Fahrzeugbaureihen zu erleichtern, wird zudem auf einen Vierzylindermotor gewechselt. Der neuere B48A20S wird im U11 als M35i mit Allradantrieb, aber ohne Hybridisierung angeboten. Die neu angedachte Topologie quer eingebautem Vierzylinder-Verbrennungsmotor und elektrisch angetriebener Hinterachse als serieller Hybrid wurde bisher durch BMW nicht umgesetzt, aber als machbar eingeschätzt [vgl. Abb. 1]. Die Inbetriebnahme des B48 mit einem offenen xETK-Steuergerät und der sukzessive Umbau auf Ethanolbetrieb mit Vorkammerzündkerzen kann auf dem Motorenprüfstand erfolgen und dann idealerweise 1:1 aufs Fahrzeug übertragen werden.

- PrOpS: MPC + DP fertig, Integration RL

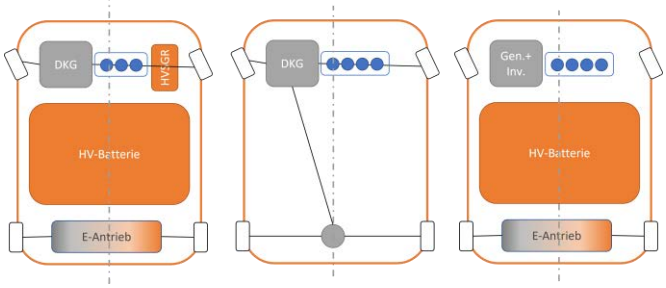


Abbildung 1: Vergleich verschiedener Antriebstopologien auf Basis des BMW U11. Links: P4-Parallelhybrid mit B38. Mitte: rein verbrennungsmotorischer Antrieb mit B48 und Allradantrieb. Rechts: serieller Hybrid mit B48 und elektrischer Hinterachse.

Die zweistufige prädiktive Betriebsstrategie wurde simulativ auf einen veröffentlichungswürdigen Stand entwickelt. Auf der modellprädiktiven unteren Ebene wurden wie geplant Schaltkosten implementiert, um unerwünscht häufige Betriebspunktwechsel des ICE zu beschränken. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde ein Satz von Gewichtungsfaktoren für das Kostenfunktional ermittelt, der in verschiedenen Fahrzyklen eine gute Performance zeigt. Zum Abschluss soll mithilfe eines *Reinforcement-Learning*-Ansatzes untersucht werden, ob abhängig von der aktuellen Fahraufgabe variable Kostenfaktoren möglicherweise eine noch weitere Verbesserung des Fahrzeugverhaltens in den definierten KPIs ermöglichen können (Kraftstoffverbrauch, ICE-Stationärbetrieb, Batteriebelastung, Abweichung von der SoC-Referenztrajektorie). Dabei wird das Fahrzeug mitsamt seiner Umgebung als RL-*Environment* definiert, die zu variierenden Gewichtungsfaktoren sind die *Actions*, die durch den Agenten beeinflusst werden.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Der Aufbau des Demonstratorfahrzeugs wird mit studentischer Unterstützung dem Ausbau des Drei- und dem provisorischen Einbau des Vierzylindermotors beginnen. Die geometrische Integration wird dabei durch den Projektpartner HDC Blueprints erfolgen. Mit der Inbetriebnahme der Ladegruppe aus B48-Verbrennungsmotor, Emrax-Generator und DTI-Inverter ist der entsprechende Meilenstein abgeschlossen.
Die simulative Darstellung der prädiktiven Betriebsstrategie ist für ihren endgültigen Abschluss auf ein erfolgreiches Anlernen des RL-Agenten angewiesen. Der Meilenstein ist durch Vergleich mit konventionellen Betriebsstrategien (ohne modellprädiktive Regelung) und entsprechende Dokumentation abzuschließen.

***Kurzbiographie Autor* — Mr. Böhme graduated from Technical University Munich in 2020 with an M.Sc. in mechanical engineering. In his studies he focused on automotive engineering, particularly the simulation of vehicle dynamics and ADAS functions. Meanwhile, he gained OEM experience in whole-vehicle platform architecture at an early stage and in the development of hybrid powertrain efficiency functions.**

Mr. Böhme is currently a research associate at the Institute for Vehicle Powertrains at the Bundeswehr University in Munich. As part of the research project MORE, he works on the simulative design, evaluation, operating strategies and functional integration of innovative hybrid powertrain concepts.

Steigerung der Agilität im Management von universitären Forschungsprojekten

Christina Groß, Gertraud Wolf

I. Forschungsschwerpunkt

Frau Groß und Frau Wolf sind für das Dtec.Bw Projekt MORE für das Projektmanagement zuständig. Das Aufgabenfeld erstreckt sich von Planung, Definition, Durchführung, Controlling bis Abschluss des Projektes.

Sie sind für die Erstellung von Berichten und Vorlagen in Zusammenarbeit mit der marketingverantwortlichen Mitarbeiterin zuständig. Eine weitere zentrale Aufgabe besteht in der Unterstützung der Veranstaltungsplanung. Zudem verantworten sie die Einhaltung und Pflege des Projektplans sowie die Bearbeitung von Arbeitspaketen. Die Kommunikation mit dem Steuerkreis des Projekts MORE sowie die Verwaltung und Überwachung der Projektfinanzen fallen unter anderem ebenfalls in ihren Aufgabenbereich.

II. Vorgehensweise

Im Projekt wurde der universitäre Forschungsansatz systematisch an ausgewählten Praxisprojekten angewendet und erprobt. Ziel war es, theoretische Konzepte, Methoden und Modelle unter realen Rahmenbedingungen zu testen, ihre Praxistauglichkeit zu überprüfen und iterativ weiterzuentwickeln. Durch den kontinuierlichen Abgleich zwischen wissenschaftlicher Entwicklung und praktischer Umsetzung konnten belastbare Erkenntnisse zur Übertragbarkeit, Wirksamkeit und Skalierbarkeit des Ansatzes gewonnen werden.

Es wurde ein integrativer Steuerungsansatz umgesetzt (Abb. 1), der Top-down- und Bottom-up-Elemente miteinander verbindet. Dabei wurden Top-Management, mittleres Management und Projektpersonal gleichermaßen in Entscheidungs- und Entwicklungsprozesse eingebunden, um klare Strukturen, Motivation und Innovationspotenziale zu fördern. Ein integriertes Risikomanagement unterstützte die systematische Berücksichtigung unterschiedlicher Interessen der Kooperationspartner und trug zur frühzeitigen Identifikation und Bewältigung potenzieller Zielkonflikte bei. [1]

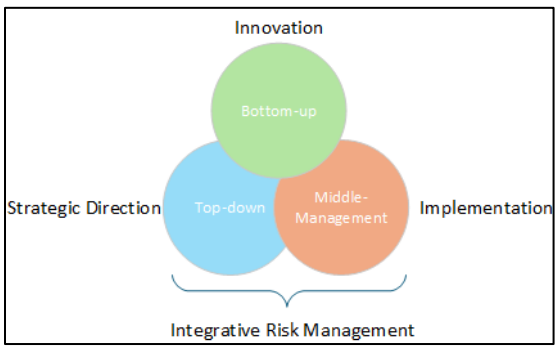


Abbildung 1: Integrative Management Strategy [1]

Darüber hinaus wurde ein systematischer Bezug zu den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen (SDGs) hergestellt: Auf Basis von Experteninterviews wurden die fünf für das MORE-Projekt relevantesten SDGs identifiziert und im Rahmen eines risikobasierten Ansatzes unter Einbezug von Methoden aus dem Risikomanagement der Bundeswehr in einem digitalen Risikozwilling abgebildet und bewertet. [3]

III. Ergebnisse 2025

Hierfür wurde auf Basis einer Veröffentlichung nach Gross [2] eine systematische Vorgehensweise entwickelt, welche den Risikomanagementprozess und die damit verbundenen SDGs in den Projektprozess miteinbeziehen kann. Hierbei werden zuerst die Problemstellung, Forschungsfragen und die Zielsetzung definiert. Darüber hinaus wird speziell der jeweilige Nutzen sowohl für die Bundeswehr als auch die Gesellschaft dargestellt. Dies ermöglicht eine integrative Implementierung der SDGs. In einem zweiten Schritt wird auf Basis dieser Forschungsfragen und Zielsetzungen die jeweiligen Arbeitspakete inkl. Stopp-Kriterien (Kosten, Zeit, Risiken) definiert. In einem dritten Schritt werden die Risiken in ein Software Tool (RIAAT) übertragen und bei entsprechender Gewichtung quantifiziert. In einem vierten Schritt werden die Meilensteine, basierend auf der definierten Annahme- und Ablehnungskriterien, bewertet. Die Evaluation erfolgt anhand einer probabilistischen Darstellung für Kosten und Zeit. Somit werden Budget mit tatsächlichen Kosten und Zieldatum mit tatsächlichem Fertigstellungsdatum verglichen. Simuliert wird dies mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation. Darauf aufbauend können Gegenmaßnahmen ergriffen werden, um den Projektfortschritt und somit die Zielerreichung sicherzustellen. Dies fördern auch die Kommunikation und die Koordination der Risiken untereinander. Abbildung 2 veranschaulicht dies.

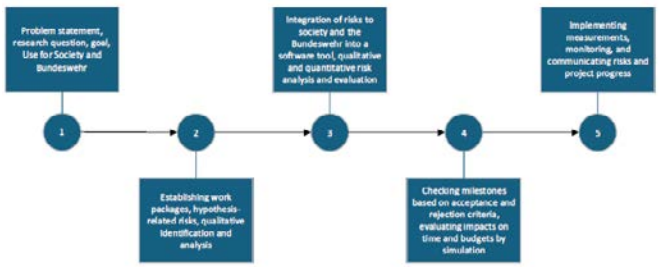


Abbildung 2: Risikomanagementprozess [3]

Langfristig konnte hierbei die Zielerreichung, die Prognosen und die Einhaltung des Zeit- und Budgetrahmens mithilfe der angepassten Vorgehensweise für universitäre Forschungsprojekte verbessert werden. In einem nächsten Schritt wurde hierzu das Projektmanagement Tool – scientific-orientated project management procedure (Sco-PmP) – entwickelt, welches vor allem für Projekt managen und steuern verwendet wird. Das Tool dient zur Datensammlung und zur

Veranschaulichung der Ergebnisse. Erfolgreich validiert wurde das Tool anhand diverser großer und komplexer universitärer Forschungsprojekte an der Universität der Bundeswehr München.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Allgemein wird im Jahr 2026 das entwickelte Tool weiter getestet und kontinuierlich anhand der praktischen Anwendung weiterentwickelt. Dis stellt sicher, dass eine Nachvollziehbarkeit, Übersichtlichkeit und Nutzenmaximierung im Projekt gewährleistet wird.

In Q1 wird zudem die Projektplanung mithilfe des Project Risk Twins weitergeführt und die Impactfaktoren der gesellschaftlichen Risiken werden eingehend untersucht. Dies stellt sicher, dass Risiken bestmöglich erkannt und damit der Forschungsoutput maximiert wird. Dies verfeinert zudem die Vorgehensweise für Forschungsprojekte und optimiert die Prozesse.

In Q2 werden die Forschungsrichtlinien in die Projetgestaltung miteinbezogen, welches die Qualität der Forschungsergebnisse nachhaltig verbessern soll. Dies ermöglicht zudem eine strukturierte und transparente Prozessgestaltung mit einer zielgerichteten Steuerung.

In Q3 erfolgt dann die tatsächliche Anwendung von den beiden vorangegangenen Quartalen. Dies stellt sicher, dass die weiterentwickelte Vorgehensweise praxisnah und transparent dargestellt ist.

In Q4 werden dann die wissenschaftlichen Forschungsprozesse unter Berücksichtigung der Bedürfnisse der Forschung sowohl für die Bundeswehr als auch die Gesellschaft optimiert. Hierzu werden zwei Testzyklen gestartet.

V. Literaturverzeichnis

[1] C. A. Gross, L. M. Grundl., G. Wolf, C. Zimmermann, C. Trapp und P. Sander, „Efficient Collaboration between Industry and Universities: Opportunities, Challenges, and an Integrative Project Plan," ce/papers, Bd. 8, Nr. No.3-4, pp. 61-70, 2025

[2] C. A. Gross, P. Sander und C. Trapp, „Improving Risk Management in University Research: Identifying Critical Risks with a Digital," *Proceedings of the 6th South American Conference on Industrial Engineering and Operations Management,* pp. 73-84, 12 Mai 2025.

[3] G. Wolf, C. A. Gorss, C. Trapp, C. Zimmermann und P. Sander, „From Innovation to Impact: Embedding Sustainable Development Goals in University Research Projects - A Risk Management Perspective," Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 14 Oktober 2025.

***Kurzbiographie Autorin* — Christina Groß ist 1995 geboren und hat an der HAW Landshut Fahrzeugtechnik und Systems Engineering studiert. Direkt nach ihrem Masterabschluss ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität der Bundeswehr geworden. In diesem Bereich ist sie als Projektmanagerin für das Forschungsprojekt MORE tätig.**

***Kurzbiographie Autorin* — Gertraud Wolf ist 1997 geboren und hat an der TH Deggendorf Bau- und Umweltingenieurwesen studiert. Ihr Fokus liegt sowohl in der Forschung als auch in der Praxis auf Projektmanagement, Technischer Gebäudeausrüstung (TGA) und Building Information Modeling (BIM) in der Planungsphase von Bauprojekten. Im Bereich der Forschung und des Projektmanagements ist sie für das Forschungsprojekt MORE tätig.**

Weiterentwicklung und Anwendung von CFD-Simulationen zur Analyse des hRCCI-Verbrennungskonzepts

Larissa M. Grundl

I. Forschungsschwerpunkt

Der Forschungsschwerpunkt liegt auf der Weiterentwicklung numerischer Simulationsmethoden zur Untersuchung der homogenen reaktivitätsgesteuerten Kompressionszündung (hRCCI) unter Verwendung alternativer Kraftstoffe. Ziel ist es, mithilfe dreidimensionaler CFD-Simulationen ein detailliertes Verständnis der Strömungs-, Gemischbildungs- und Verbrennungsprozesse im Brennraum zu erlangen und damit die Selbstzündung sowie die Verbrennungsphasen gezielt analysieren und beeinflussen zu können.

Ein besonderer Fokus lag auf der detaillierten Abbildung der unterschiedlichen Einspritzstrategien (Direkteinspritzung und Saugrohreinspritzung) mit den verwendeten alkoholbasierten Kraftstoffen sowie auf der Untersuchung des Einflusses skalenauflösender Turbulenzmodellierung auf die Temperatur- und Kraftstoffverteilung im Zylinder. Die Simulationen wurden mit experimentellen Daten eines Einzylinderprüfstands validiert, um die Aussagekraft der Modelle sicherzustellen und deren Vorhersagegenauigkeit kontinuierlich zu verbessern.

II. Vorgehensweise

Im Jahr 2025 wurde die bestehende Simulationsmethodik systematisch erweitert und überarbeitet. Zunächst erfolgte eine grundlegende Überarbeitung der Methodik zur Abbildung der Direkteinspritzung, insbesondere hinsichtlich der Spraymodellierung, der Randbedingungen und der kraftstoffspezifischen Eigenschaften. Aufbauend darauf wurde erstmals eine konsistente Methodik zur Abbildung der Saugrohreinspritzung in das bestehende CFD-Setup integriert.

Parallel dazu wurde die Validierung der Simulationen anhand realer Messdaten vom Einzylinderprüfstand vorangetrieben. Hierzu wurden sowohl RANS- als auch PANS-Simulationen durchgeführt und mit experimentellen Druck-, Temperatur- und Verbrennungskenngrößen verglichen. Die Methodik für skalenauflösende PANS-Simulationen wurde gezielt erweitert, um eine realistischere Abbildung der Turbulenzstrukturen und deren Einfluss auf die Gemischbildung zu ermöglichen.

III. Ergebnisse 2025

Im Berichtsjahr 2025 konnten einige Fortschritte erzielt werden. Die überarbeitete Methodik für die Direkteinspritzung zeigt eine verbesserte Übereinstimmung mit experimentellen Referenzdaten (vlg. Abbildung 1). Dazu wurden unter anderem eine zusätzliche Kalibrierung des Verdampfungsmodells von Oktanol mit experimentellen Daten von Verbinska et al. [1] durchgeführt. Zusätzlich wurde erfolgreich eine Methodik für die Saugrohreinspritzung in die bestehende Simulationsumgebung integriert und getestet.

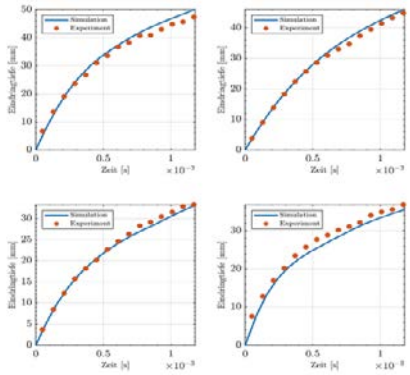


Abbildung 1: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten der Direkteinspritzung von Oktanol für verschiedene Betriebspunkte. MP04: 200 bar Raildruck, 5 bar Kammerdruck absolut (oben links), MP05: 100 bar Raildruck, 5 bar Kammerdruck (oben rechts), MP07: 100 bar Raildruck, 10 bar Kammerdruck (unten links) und MP09: 200 bar Raildruck, 10 bar Kammerdruck (unten rechts).

Ein zentraler Meilenstein war die Validierung erster vollständiger Brennraumsimulationen mit realen Messwerten vom Einzylinderprüfstand. Dies erfolgte sowohl für RANS-Simulationen als auch für skalenauflösende PANS-Simulationen. Abbildung 2 zeigt dies beispielhaft für eine PANS Zylus. Dieser befindet sich zwischen dem minimalen und maximal gemessenen Zylinderdruckverläufen vom Versuchsmotor.

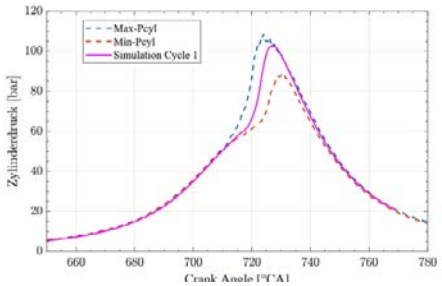


Abbildung 2: Validierung eines PANS Zylus für die Motorensimulation.

Darüber hinaus konnten erstmals PANS-Simulationsergebnisse ausgewertet werden, die den Einfluss der lokalen Temperatur- und Gemischverteilung auf den Verbrennungsbeginn und die Verbrennungscharakteristik untersuchen. Diese Ergebnisse liefern wichtige Hinweise darauf, wie das Strömungsfeld im Zylinder die Selbstzündung und die räumliche Ausbreitung der Verbrennung beeinflusst.

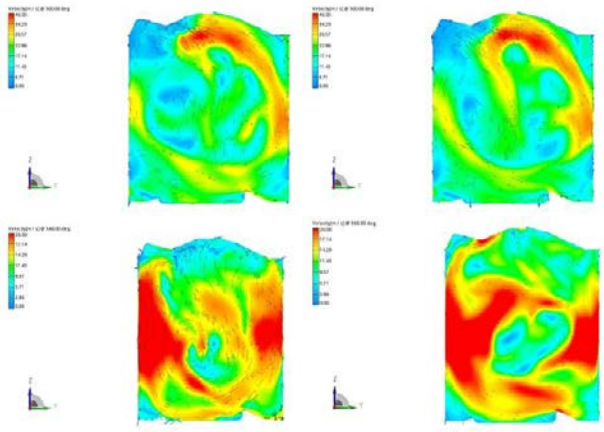


Abbildung 3: Strömungsfelder im vertikalen Schnitt mittig durch den Zylinder für zwei verschiedene Zyklen. Links bzw. rechts im Bild jeweils ein Zyklus zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Abbildung 3 zeigt das Strömungsfeld im vertikalen Schnitt mittig durch den Zylinder für zwei verschiedene Zyklen der PANS-Simulation für unterschiedliche Zeitpunkte. In den oberen beiden Bildern bei 500 °KW ist zu erkennen, dass sich eine Tumbleströmung anfängt auszuprägen. Der Vergleich zwischen den beiden oberen Bildern zeigt eine Variation des Rotationszentrums. Bei den beiden unteren Bildern bei 560 °KW ist der Tumble bereits stark ausgeprägt. Es sind auch hier Unterschiede in der Ausprägung und der Rotationsachse zu erkennen. Die Unterschiede im Strömungsfeld haben einen Einfluss auf die Gemischbildung und das Temperaturfeld im Brennraum.

In Abbildung 4 ist die Kraftstoff- und Temperaturverteilung im Brennraum kurz vor der Zündung bei 716 °KW zu sehen. Zur besseren Übersicht wurde nur Zyklus 1 dargestellt. Dabei entsprechen die orangen Volumina, Bereichen mit stöchiometrischen Verhältnissen und die gelben Volumina kennzeichnen Bereiche mit den höchsten Temperaturen im Brennraum. Die roten Kreise sollen die Bereiche einer Überschneidung von stöchiometrischen Bedingungen und hohen Temperaturen hervorheben. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund der reaktionskinetisch günstigen Bedingungen die Selbstzündung in diesen Bereichen startet.

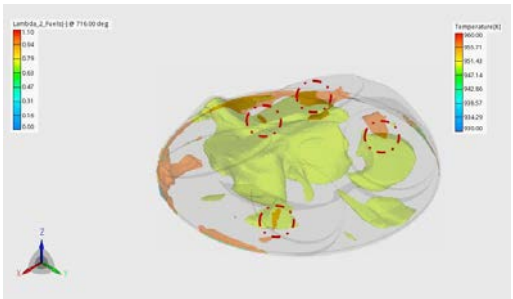


Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung der Kraftstoff- und Temperaturverteilung als Isovolume Plot im Zylinder bei 716 °KW für Zyklus 1.

Die Annahme wird in Abbildung 5 bekräftigt. Dabei sind auf der linken Seite die Zündbereiche von Zyklus 1 dargestellt. Im oberen linken Bild bei 720 °KW ist zu sehen, dass die realen Zündbereiche mit den identifizierten Zündbereichen aus Abbildung 4 zusammenfallen. Die Verbrennung startet in mehreren Bereichen im Brennraum. Auf der rechten Seite ist ein zweiter Zyklus zu sehen, bei dem aufgrund von einem veränderten Strömungsfeld ein anderes Kraftstoff- und Temperaturfeld kurz vor der Zündung auftritt. Aufgrund von den veränderten Bedingungen zündet das Gemisch an anderen Stellen und die Verbrennung schreitet anders voran als im bereits betrachteten Zyklus 1.

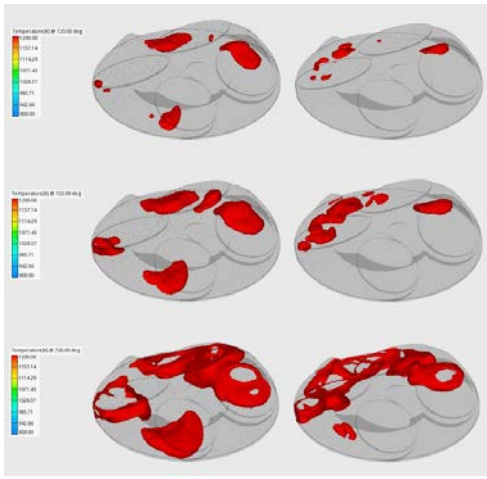


Abbildung 5: Zündbereiche für zwei verschiedene Zyklen. Links Zyklus 1, rechts Zyklus 2.

I. Ausblick und nächste Schritte für 2026

In den kommenden Arbeiten wird die PANS-Simulation auf mehrere aufeinanderfolgende Zyklen erweitert, um zyklische Schwankungen sowie den Einfluss des Strömungsfeldes auf die Gemisch- und Temperaturverteilung im Brennraum analysieren zu können. Ziel ist es, belastbare Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen Strömungsfeld, Gemischbildung und Selbstzündung zu ziehen.

Darüber hinaus ist eine weitergehende Validierung der skalenauflösenden Simulationen mit zusätzlichen Prüfstandsdaten vorgesehen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen genutzt werden, um die Simulationsmethodik weiter zu verfeinern und als zuverlässiges Werkzeug für die Auslegung und Optimierung des hRCCI-Verfahrens einzusetzen.

Literaturverzeichnis

[1] G. M. Verbinska, N. Atamas, G. Tarnyik, I. Matushko, and A. V. Brytan, "Low-Power Optical Irradiation Influence on Alcohols Droplets Evaporation Processes," in *Springer Proceedings in Physics, Nanooptics and Nanoelectronics, Nanobiotechnology, and Their Applications*, O. Fesenko and L. Yatsenko, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 21–30

***Kurzbiographie Autor* — Larissa Grundl absolvierte ihr Bachelor- und Masterstudium im Maschinenbau an der Hochschule München. Seit 2021 ist sie an der Universität der Bundeswehr München an der Professur für Fahrzeugantriebe tätig. Ihr Forschungsschwerpunkt liegt auf der dreidimensionalen numerischen Strömungssimulation von Verbrennungsprozessen mit alternativen Kraftstoffen.**

Reactivity controlled compression ignition RCCI – 0D/1D Simulation with Test and Application

Pravin Kumar Sundaram

I. Focus of Research

As part of the dTEC MORE project, a serial hybrid drive [1] is being developed under the topic of energy and drives. This serial hybrid drive consists of an internal combustion engine with alternative renewable fuels as an energy source, an electric motor for propulsion and a battery for charging. The aim of the project is to use a highly efficient and low-emission engine. One solution is an internal combustion engine with an RCCI combustion process. hRCCI, or homogeneous Reactivity Controlled Compression Ignition [2], is an innovative HCCI combustion process with two fuels (Homogeneous Charge Compression Ignition). RCCI is a low-temperature combustion process [3] that uses two fuels, one with low reactivity and the other with high reactivity and without external energy transfer (no spark plug). It offers the advantages of high efficiency, low soot and nitrogen emissions and better combustion control. This RCCI concept is new and offers many challenges. This concept will offer even greater advantages when using renewable fuels such as ethanol and octanol. Therefore, this concept has been researched. This concept will be tested on the test bench, optimized and applied to the research vehicle. Furthermore, there is no predictive simulation model for this combustion concept, and this is the focus of the research [4].

The target of the research project at UniBw, Munich is to rebuild an existing single cylinder research engine for testing the proposed hRCCI combustion concept, test the engine at different operation points to study the effect of affecting parameters, develop a novel simulation strategy for simulation of the model, validate the simulation model against the test results and use the simulation model to predict the engine characteristics for the proposed application vehicle. In the year 2025, the test campaign for the research engine was completed and a fully predictable simulation model has been developed and validated against the test results. The robustness of the simulation model is also validated and the model is available to predict the performance and emissions of the combustion engine for the application engine in the serial hybrid powertrain.

II. Method & Procedure

1.) Testing

Table 1 Specification of the test engine

Displaced volume	486 cc
Stroke	92 mm
Bore	82 mm
Connecting Rod	185 mm
Compression ratio	14:1
Number of Valves	4
Idle Engine speed	800 rpm
Maximum Cylinder pressure	130 bar
Valve train	DOHC - VVT

Table 2 Specification of the baseline operation point

Engine Speed	1000 rpm
IMEP H	5.2 bar
Premixed Ratio	65 %
Lambda	2.9
Intake Temperature	92 °C
Intake Pressure	1.68 bar (absolute)
Port Fuel Injection	Ethanol
PFI – Start of Injection	330 °CA bTDC
PFI – Injection duration	6 ms
Direct Injection	Octanol
DI – Start of Injection	90 °CA bTDC
DI – Injection duration	0.7 ms
DI – Injection pressure	200 bar

Table 3 Setup for the parameter study conducted

Start of DI injection sweep (°CA bTDC)	[80, 90, 100, 110]
Intake Temperature (°C)	[89, 92, 96, 98, 100]
Intake Pressure (bar) / Lambda	[1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9] / [2.4, 2.7, 2.9, 3.1, 3.3]
Premixed ratio (%)	[54, 58, 61, 64, 68]
Valve overlap (°CA)	[-20, -10, 0, 15, 25]
Rail pressure (bar)	[140, 160, 180, 200]
Engine Speed (rpm)	[1000, 1500, 2000]

2.) Simulation

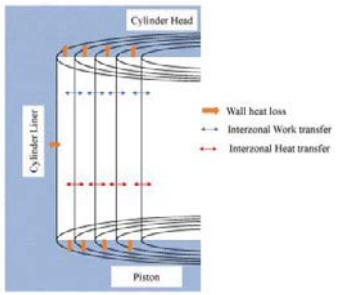


Figure 1 Conceptual representation of the simulation model

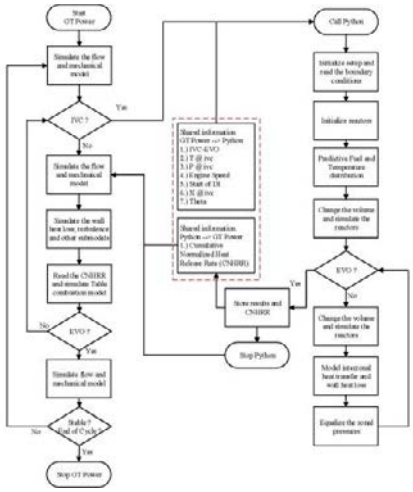


Figure 2 Co-Simulation Scheme of GT Power with Python Cantera

List of sub models used:

- Wall heat loss → Hohenberg model
- Vaporization → Modified Arrhenius
- Interzonal heat transfer → Yang Martin Model
- Zonal division → simple radial zonal division
- Pressure equalization → interzonal work (P-V)
- Wall film vaporization → Modified Arrhenius
- Fuel and Temperature distribution → novel physics informed neural network model

III. Results 2025

1.) Testing

Parameter	Früh	Schnell	η	THC	CO	NOx	Ruß	Kommentar
hRCCI vs SI	ja	ja	-	nein	nein	ja	ja	Different fuels and different lambda → lower effective emissions
Early Injection (DI)	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja	Early → large wall film
Higher intake temperature	ja	ja	ja	ja	ja	nein		Higher temperature helps combustion; too high is knocking
Higher intake pressure	ja	nein	nein	ja	nein	ja	ja	Combi effect – High pressure vs lean mixture
Higher % Ethanol (PR)	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja	Higher octanol is better but higher soot
Single vs Split DI	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein	Early injection leads to high wall film- too difficult to split the injection
Higher DI Pressure				nein	nein	ja	ja	Requires optimum value, not very high differences
Lower (neg) Valve Overlap								Requires optimum value, NVO helps to offset the cold misfiring
Engine Speed			ja	ja	ja	ja	nein	

Figure 3 Summary of test results from the parameter study – to show the effect of the control parameters on the engine performance and emissions with hRCCI concept.

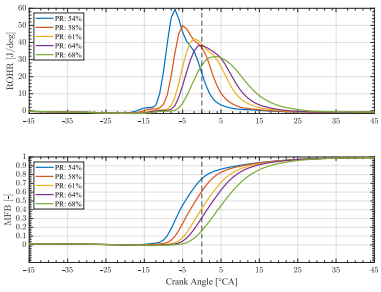


Figure 4 Effect of premixed ratio on the combustion phasing represented as heat release and integral burn rate plots.

2.) Simulation

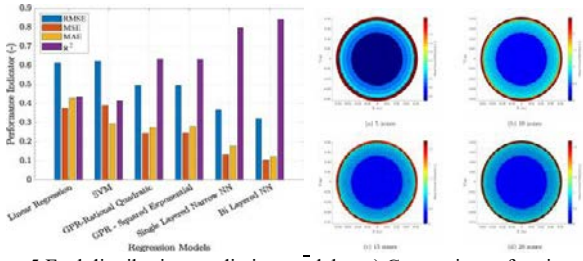


Figure 5 Fuel distribution prediction model – a.) Comparison of various regression models used b.) Fuel distribution for multiple zones from 3D CFD simulation results compiled for the model development

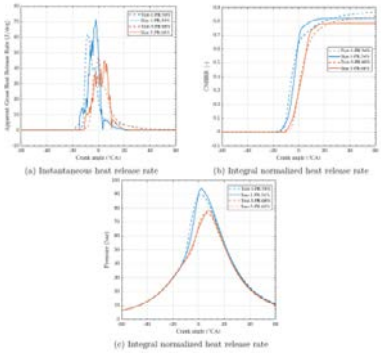


Figure 6 Performance of the simulation compared to the test results for various premixed ratio scenarios showing the robustness of the model

IV. Outlook & Steps for 2026

As the future step, the developed model has to be used to predict the performance at the operation points for the application engine for the serial hybrid powertrain.

V. References

[1] C. Trapp and M. Böhme, "Innovative, modular serial hybrid concept for a highly efficient, clean automotive powertrain," in *Proceedings, 22. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss, and A. Wagner, Eds., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, pp. 124–141.

[2] Grundl, L.M., Sundaram, P.K., Loffredo, F., Pang, G.A., Trapp, C.T., Ed., *Alternative combustion concept for a highly phlegmatized hybrid powertrain - Simulation and validation of dual fuel homogeneous charge compression ignition engine using chemical kinetics with 1-D Simulation & 3-D-CFD-Software.*: OVK - Austrian Society of Automotive Engineers, 2023.

[3] Amin Paykani, Amir-Hasan Kakaee, Pourya Rahnama, Rolf D Reitz, "Progress and recent trends in reactivity-controlled compression ignition engines," 17 (5) 481-524.

[4] P. K. Sundaram, L. M. Grundl, and C. Trapp, "Advancements in Combustion Modeling and Simulation for an Innovative Homogenous Reactivity-Controlled Compression Ignition (hRCCI) Concept," SAE International, SAE Technical Paper, Apr. 2024. [Online]. Available: https://saemobilus.sae.org/papers/advancements-combustion-modeling-simulation-innovative-homogenous-reactivity-controlled-compression-ignition-hrcci-concept-2024-01-2691

Kurzbiographie Autor

- Born in 1991, Coimbatore, India
- Studied M.Sc. in Vehicle Engineering at the Aachen University of Applied Sciences (2019-2021).
- Worked as a Calibration Engineer & Transmission Development Engineer at Ashok Leyland Commercial Vehicles GmbH, India, (2013 – 2019).
- Since January 2021, has been working as a Research Associate at the Laboratory for Vehicle Drives, Universität der Bundeswehr, Munich.
- Core research focus: 0D/1D simulation of hRCCI combustion processes, testing and application – general new combustion processes and alternative fuels

Pre-chamber combustion concept with renewable fuels

Vishalkumar Joshi, M.Sc., Professeur für Fahrzeugantriebe – MB 5.2

I. RESEARCH FOCUS

This report provides a detailed overview of the testing, applied development and evaluation of passive pre-chamber ignition systems for spark-ignition engines, with particular emphasis on improving combustion stability, efficiency, and ultra-lean operating capability. The work aims to assess the practical performance potential of pre-chamber ignition concepts under realistic engine operating conditions and to benchmark them against conventional spark ignition systems.

A central objective of the research is the experimental investigation of passive pre-chamber ignition using ethanol or hydrogen as a renewable fuel. Hydrogen operation enables ultra-lean combustion but poses challenges related to ignition stability, flame propagation, and combustion robustness, particularly at low engine loads. The research, therefore, concentrates on identifying operating limits, stable combustion regions, and efficiency-relevant operating points enabled by pre-chamber ignition.

The work follows a strongly application-oriented approach, combining simulation-supported design with systematic experimental validation. Pre-chamber geometries developed using 0D/1D and 3D CFD simulations are manufactured and evaluated on an engine test bench. The experimental investigations focus on low-load and ultra-lean conditions, where pre-chamber ignition is expected to provide the greatest benefit compared to conventional spark ignition.

The long-term objective of this research is to transfer the gained knowledge to multi-cylinder engine applications and to support the development of highly efficient engine concepts for future hybrid powertrains operated with renewable fuels. In this context, the results obtained with hydrogen serve as a basis for extending the methodology toward serial hybrid engines and alternative renewable fuels such as ethanol. are crucial.

II. METHOD

The research methodology follows an application-oriented development approach combining system-level simulation, three-dimensional CFD analysis, hardware prototyping, and experimental engine testing.

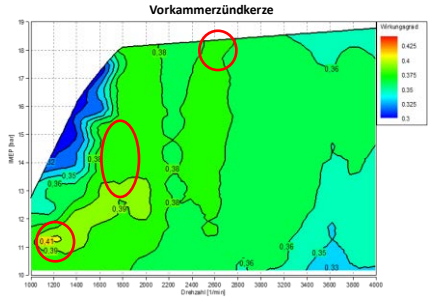


Fig 1: High efficiency operating points with the required load using ethanol

The objective is to evaluate and compare pre-chamber ignition systems with conventional spark ignition under realistic operating conditions. Zero- and one-dimensional (0D/1D) engine simulations were performed to model the overall engine process and to generate consistent boundary conditions for the subsequent CFD investigations. These simulations were used to define key parameters such as pressure, temperature, mass flows, and residual gas fractions at relevant operating points, ensuring realistic and reproducible input conditions for the three-dimensional simulations.

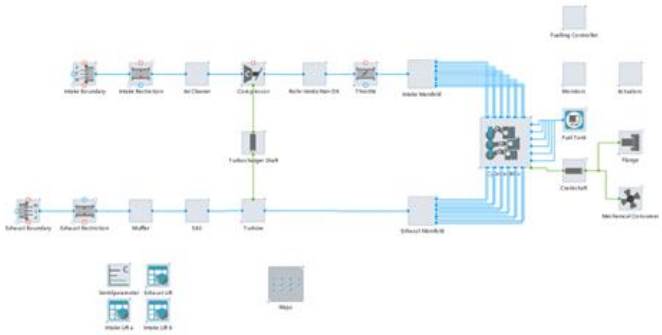


Fig 2: 0D-1D simulation model of 3-cylinder BMW engine

Based on the derived boundary conditions, 3D CFD simulations were conducted to analyse flow behavior, mixture distribution, ignition, and combustion processes in the pre-chamber and main combustion chamber. Emphasis was placed on accurately capturing the ignition process within the confined pre-chamber volume, enabling a physically consistent assessment of early flame kernel formation and jet ignition behaviour. The simulation results were used to guide the design of improved pre-chamber geometries before manufacturing.

Modular pre-chamber spark plug prototypes were developed based on the simulation findings. The modular design enables systematic variation of key geometric and thermal parameters, including pre-chamber volume, nozzle configuration, and electrode design, allowing for efficient experimental comparison of different concepts.



Fig 3: Modular prechamber concept with thermocouples[1]

Experimental investigations were carried out on an engine test bench. The methodology was initially validated on a

single-cylinder research engine and subsequently transferred to a multi-cylinder spark-ignition engine platform for applied evaluation. Engine testing focused on comparing conventional spark plugs and pre-chamber spark plugs over a wide range of operating conditions across the engine map.

III. Results 2025

Figure 4 presents the low-load combustion performance of a single-cylinder engine operated with hydrogen at 1000 rpm and an indicated mean effective pressure of 0.5 bar. The results compare a conventional spark plug with two passive pre-chamber ignition systems, namely a baseline pre-chamber and an optimized asymmetric pre-chamber design. The evaluation is based on variations of the excess air ratio (λ) and ignition timing, providing insight into combustion stability and completeness under ultra-lean conditions.

The coefficient of variation of IMEP (COVIMEP), shown in Figures 4a and 4c, is used as an indicator of combustion stability and engine smoothness. The results show that both pre-chamber configurations achieve lower COVIMEP values than the conventional spark plug across the investigated operating range. In particular, the optimized asymmetric pre-chamber maintains low variability even at higher excess air ratios and retarded ignition timings, indicating robust ignition behavior under challenging low-load conditions.

Figures 4b and 4d show the corresponding unburnt hydrogen emissions for the λ variation and ignition timing sweeps. In all cases, the pre-chamber ignition systems result in lower hydrogen emissions compared to the conventional spark plug, demonstrating improved combustion completeness. The optimised pre-chamber exhibits the lowest hydrogen emissions, particularly at leaner conditions, highlighting its enhanced flame initiation and propagation characteristics.[1]

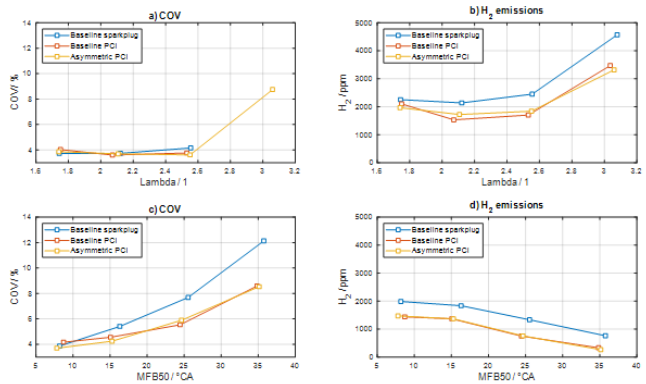


Fig 4: 1000 rpm; 0.5 bar IMEP a) Coefficient of Variation COV of IMEP; λ variation; MFB50 = 8°CA b) H2 emissions; λ variation; MFB50 = 8°CA c) COV; spark sweep; λ=2 d) H2 emissions; spark sweep; λ=2 [1]

Overall, Figure 4 demonstrates that passive pre-chamber ignition significantly improves low-load hydrogen combustion compared to conventional spark ignition. The combination of reduced combustion variability and lower unburnt hydrogen emissions indicate enhanced ignition robustness and more stable flame development, with the optimized asymmetric pre-chamber providing the best performance among the investigated ignition concepts. Overall, the figure demonstrates that pre-chamber ignition enables stable and efficient combustion under low-load and ultra-lean hydrogen operation, outperforming conventional spark ignition in terms of stability and combustion completeness.

IV. Overview and Next Steps for 2026

The results obtained in 2025 demonstrate that passive pre-chamber ignition systems offer significant potential for improving combustion stability and extending lean operating limits when using renewable fuels, particularly under low-load and ultra-lean conditions. The findings provide a robust experimental foundation for transitioning from concept-level investigations toward a system-oriented engine development approach.

In 2026, the research focus will shift toward the development of a complete engine system optimized for operation with renewable fuels. A smaller-displacement spark-ignition engine will be used as a flexible research platform, enabling systematic investigation of pre-chamber ignition behavior under controlled and representative operating conditions. The engine will be equipped with both port fuel injections and direct fuel injection systems, allowing direct comparison of mixture formation strategies and their interaction with pre-chamber ignition across a wide operating range.

The experimental investigations will concentrate on evaluating the influence of fuel type, injection strategy, and operating conditions on pre-chamber ignition performance, combustion stability, and efficiency. Emphasis will be placed on understanding how pre-chamber ignition behaves under different mixture preparation concepts and how these effects can be exploited to maximize efficiency and robustness for renewable fuel operations.

In the final step, the developed engine system will be integrated into a serial hybrid powertrain as a range-extending power generator. The focus will be on steady-state, high-efficiency operation over extended operating periods, where pre-chamber ignition is expected to deliver the greatest benefit. The insights gained from this work will support the development of highly efficient, fuel-flexible power units suitable for long-term operation in future hybrid energy systems.

V. References

[1] V. Joshi, A. Alkezbari, C. Trapp, G. Rottenkolber, and S. Kottakalam, “Methodology for the development of passive prechamber spark plugs for use in ultra-lean light-duty hydrogen engines,” presented at the 20th Symposium „Sustainable Mobility, Transport and Power Generation, Graz, Austria, Sep. 2025.

***Kurzbiographie Autor* — Vishalkumar Joshi is a scientific researcher specializing in prechamber combustion concepts with renewable fuels. He holds a master’s degree in Power Engineering and has been working at the University of Bundeswehr München since November 2023. His research focuses on advancing combustion technologies, including the development and optimization of prechamber combustion systems. Vishalkumar also works on 0D-1D simulation modeling to support the design and analysis of innovative combustion concepts. His work aims to contribute to sustainable and efficient energy solutions for modern engines.**

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

ENERGIE & ANTRIEB

Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Manufacturing and Testing a Five-phase Harmonic-Excited Synchronous Machine Prototype

Sukanya Kamboj

***Kurzfassung*— In this report, a prototype of the previously designed five-phase harmonic-excited synchronous machine has been manufactured and tested on the test bench. The challenges faced during the manufacturing have been discussed here. Due to the gap between designed model and prototype, the testing plan has been modified. The consequent test bench results have been presented, along-with the suggestions of the adjustments required in the 2nd prototype.**

I. Introduction and Research Focus

A five-phase harmonic-excited synchronous machine has been designed in this project. The application for the machine is traction in a plug-in hybrid electric vehicle. The final parameters of the machine can be seen in Tabelle I.

The challenges presented during the manufacturing of the prototype have been discussed here. The key topics discussed are securing the rotor windings at high rotational speeds, placement of the rotor excitation circuit, position sensor, and selection of the appropriate cooling system.

Finally, the modified test plan is discussed and the results are investigated, keeping the next prototype in mind.

TABELLE I. Machine Parameters

Parameter	Value
Stator outer diameter	190 mm
Rotor outer diameter	150 mm
Total axial length	285 mm
Air-gap length	0.8 mm
Winding factor	35% (rotor), 40% (stator)
Rater power (continuous)	80 kW
Rated speed	5000 rpm
Continuous torque @5000 rpm	154 Nm
Peak torque / Peak power	230 Nm / 120 kW
Efficiency at rated op. point	96.9%
Maximum efficiency	97.5%
Cooling method	Liquid cooling

II. Prototype Manufacturing

The machine manufacturing process is started by laser cutting the iron laminates for rotor and stator. These laminates are 0.2 mm thin, and are coated with a varnish layer to electrically isolate them from each other. These are then stacked together to form the total axial length of 285 mm. An important parameter here is the stacking factor, which is the ratio of the net iron volume to the total stacked volume. For this prototype, the stacking factor achieved by the manufacturer is 93%.

The next step is the addition of the copper windings. The stator is wound separately, while the rotor is wound after being mounted on the shaft. For achieving the winding specifications, enamelled copper coils with standard diameters are taken in parallel. This process gives a final copper fill factor in stator as 41.09%, and 35.14% in the rotor. The stator coils are routed with one cable per phase emerging from the housing. The rotor coils are routed towards the excitation circuit where the field and excitation windings are connected to each other via a diode rectifier circuit (Abb. 1).

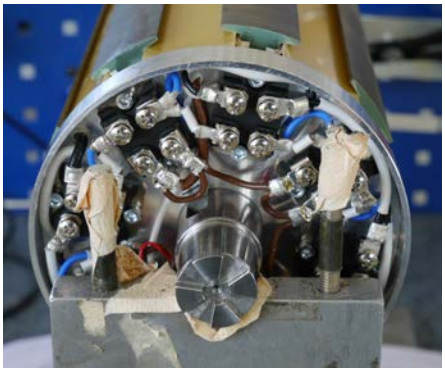


Abb. 1. Excitation circuit as mounted on the rotor

The rotor windings are secured by adding a locking wedge in the slots, and adding a carbon-fibre sleeve around the end windings. The air pockets are filled with epoxy resin, which also acts as an additional stabilising agent for the windings. This can be seen in Abb. 2.



Abb. 2. Rotor after winding and epoxy potting.

III. Test Bench Results

Due to the resulting gap between the electromagnetic model and the manufactured prototype, the test plan has been modified slightly. The test is performed till 3000 rpm, with only single current injected. This is better done from 500 rpm onward, due to high frequency current required for starting torque at zero speed [1]. The results of the simulated torque at these speeds vs the measured torque on the test bench can be seen in Abb. 3. The comparison of the reluctance torque of the model and the prototype can be seen in Abb. 4.

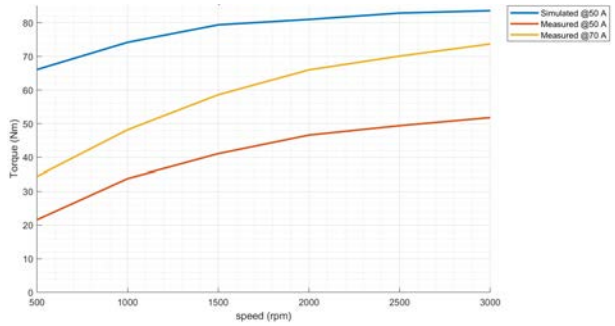


Abb. 3. Measured vs simulated torque.

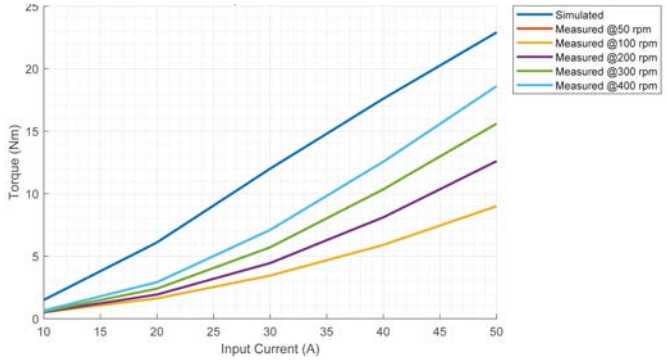


Abb. 4. Measured vs simulated reluctance torque.

IV. Analysis of Test Results

The test results show a gap in the measurements vs simulations, and show the measured torque at 60% of the simulated value. Due to lack of slip rings in the prototype, it is difficult to measure the currents in the rotor. The lower torque measured at the low speeds could also be due to the low rotor excitation from the lack of harmonic current injection. This can only be checked with an inverter capable of generating both currents.

V. Next Steps

The next step is to inspect the diode circuit in the machine, to check for any diode damages, or open circuit faults. Further, the machine would be tested with a new inverter with two input currents as originally designed for the machine [2] [3].

Further, the second prototype is expected to be tested in the next year, with full speed range and harmonic current injection. The second prototype also comes with slip rings to measure the rotor currents, voltages and temperatures.

Further steps are to test the machine with the vehicle control, and possibly even involve it in a rest bus simulation for the vehicle.

VI. Meilensteine

The status of the milestones for 2025 are summarized in Tabelle II.

TABELLE II. Meilensteintabelle

PSP Nummer	**Meilensteintabelle**			
	Arbeitspaketname	***FS_Plan***	***FS_Ist***	***FGR***
2.21.1	Vermessung EM - Erzeugung Oberwellenstrom	06.07.2025	28.02.2026	
2.21.2	Vermessung EM - Drehmomenter-zeugung	06.07.2025	18.12.2025	

A. Meilenstein 1 – Vermessung EM - Erzeugung Oberwellenstrom

During the tests performed, the inverter and the control are able to generate the current required for the torque generation at each operating point measured. However, this was only tested for the fundamental current as the inverter is only capable of single current per phase. With the next inverter, the generation of high frequency current will also be tested.

B. Meilenstein 2 – Vermessung EM - Drehmomenterzeugung

The machine tests were performed from startup till 3000 rpm of rotor speed. For these speeds, the machine was able to generate torque. Due to the lack of high frequency current at zero speed, only the reluctance torque was observed. As the speeds increased, electromagnetic torque component was also seen. Next step is to close the gap between the simulated and measured torque at all operating points.

Literaturverzeichnis

[1] S. Kamboj and D. Gerling, "Harmonic current analysis for a five-phase harmonic-excited synchronous machine," in *2024 IEEE 22nd Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*. IEEE, 6/25/2024 - 6/27/2024, pp. 1264–1268.

[2] S. Kamboj, G. Dajaku, and D. Gerling, "Five-phase harmonic-excited synchronous machine for hybrid vehicle application," in *Conference proceedings 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, Z. Leonowicz, Ed. Piscataway, NJ: IEEE, 2023, pp. 1–5.

[3] S. Kamboj, D. Gerling, A. Vijay, and G. Dajaku, "Performance analysis of a five-phase harmonic-excited synchronous machine," in *IECON 2023 - 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Piscataway, NJ: IEEE, 2023, pp. 1–5.

***Kurzbiographie Autor*— The author obtained her Master's degree in International Automotive Engineering from University of Applied Sciences Aachen, Germany in 2020.**

Since December 2020, she is a Research Scientist at the University of the Bundeswehr Munich, in the project MORE.

Electric drive development and Non-Linear dq modeling of 5 phase seperately excited synchronous machine for Hybrid Traction Application

Adithya Narayan Santhoshkumar

***Kurzfassung*— A five-phase salient-pole synchronous machine with harmonically self-excited rotor windings (SESM) has been developed for potential application in hybrid electric vehicles. Unlike conventional Permanent Magnet Synchronous Machines (PMSMs), the SESM employs controllable rotor windings instead of permanent magnets, requiring regulation of rotor excitation through stator currents. This introduces additional complexity in both machine modeling and control. This work presents a systematic workflow that integrates electromagnetic machine design in ANSYS with the development of an accurate dq-based mathematical model, which is subsequently used for electric drive design and implementation in MATLAB. The resulting control model is deployed on real hardware using Rapid Control Prototyping, enabling efficient development and validation of the proposed electric drive.**

I. RESEARCH FOCUS

The highly non-linear behavior of saturated PMSMs and the extraction of non-linear dq models using finite-element method (FEM) simulations have been previously described in [1]. In this work, a three-phase, 28-pole, 36-slot PMSM [2] is first used as a benchmark to validate the proposed modeling and control workflow. A non-linear dq model derived from an ANSYS Maxwell FEM model is implemented in MATLAB to develop a field-oriented control (FOC) strategy, which is subsequently validated through rapid control prototyping on a laboratory test bench using dSPACE.

Building on this validated workflow, the methodology is extended to a five-phase separately excited synchronous machine (SESM). In contrast to PMSMs, the SESM replaces permanent magnet flux with a rotor flux component determined by the self-inductance of the rotor windings and their mutual coupling with the stator. This results in a more complex non-linear dq dynamic model, necessitating careful electromagnetic modeling and control design. The established workflow enables the systematic development of an FOC-based electric drive for the SESM, thereby facilitating efficient control development for advanced multi-phase machines.

II. STATE OF THE ART

Rapid Control Prototyping (RCP) is widely used in industry to evaluate electric drive control algorithms on test benches without the need for low-level embedded programming. Using platforms such as dSPACE, motor drive models developed in MATLAB/Simulink can be automatically translated into real-time executable code and deployed on a real-time processor interfaced with a motor test bench. This enables rapid tuning of PI controllers and iterative refinement of the control strategy to improve drive responsiveness and efficiency. The workflow developed in this research significantly accelerates control development by leveraging an accurate ANSYS-based motor model as the foundation for controller design. This approach enables early validation and tuning of control logic, effectively bridging the gap between motor design and control engineering. Moreover, it allows control algorithms to be developed and optimized even before a physical motor prototype is available, thereby reducing development time and improving the overall efficiency and reliability of motor drive systems. Abb 1 represents the workflow adopted in this research.

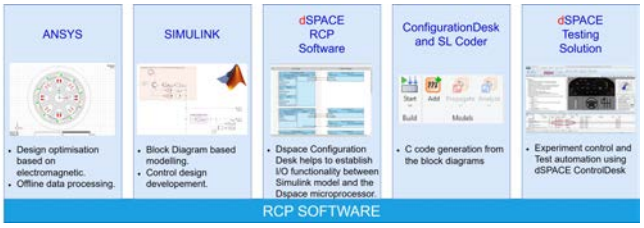


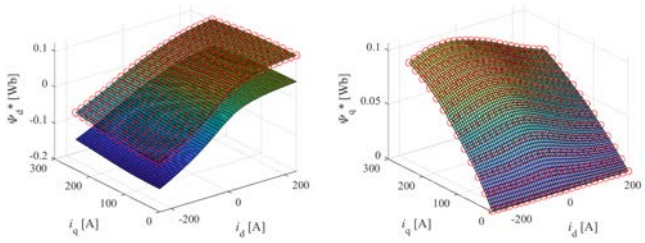
Abb. 1: RCP Workflow

III. APPROACH AND RESULTS 2025

Abb 1 represents the equation for the voltage current based on dq for a PMSM, where the values u represent the voltage values, i represent the current values, and ψ represents the flux values in both d and q directions. Here, L_a represents the apparent inductance values and L_i represents the incremental inductance values, while ψ_{md} represents the permanent magnet flux [1].

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{d,i} & L_{dq,i} \\ L_{qd,i} & L_{q,i} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d\theta}{dt} \left(\begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_d}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \psi_q}{\partial \theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -L_{q,a} \\ L_{d,a} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_{md} \end{bmatrix} \right) \tag{1}$$

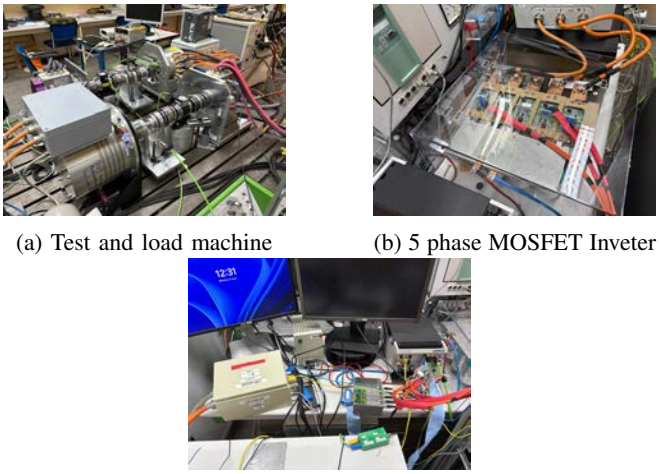
The ANSYS model of the 3-phase PMSM described in [2] was used to calculate the inductance and flux values of the motor for changing i_d and i_q values to create look-up tables. The look-up tables were interpolated using RBF interpolation to form smoother and continuous representations of the machine characteristics. The tables were then used to represent the dq machine model of the motor in Simulink. Abb 2 shows the lookup tables of flux in the d axis and q axis, as a) and b) respectively. The total flux along the d axis ψ_d^* is the sum of the induced d-axis flux and the permanent magnet flux.



(a) d axis flux (b) q axis flux

Abb. 2: dq machine model look up tables

A field-oriented control (FOC)–based control algorithm for the PMSM was developed in MATLAB/Simulink, incorporating maximum torque per ampere (MTPA) and field-weakening strategies implemented via look-up tables. Model port blocks were integrated into the Simulink model to enable communication with the dSPACE real-time controller, and the required input/output configuration was performed using dSPACE ConfigurationDesk. The experimental test bench setup is shown in Abb. 3. During testing, the PMSM was operated under current control across various load conditions, while the load machine was operated in speed control mode.



(a) Test and load machine (b) 5 phase MOSFET Inveter

(c) Dspace module

Abb. 3: 3 phase PMSM testbench

IV. Analyse and next steps

The lookup tables generated using ANSYS helped significantly in identifying the optimum operating points of the motor drive, like the MTPA points and the optimum field weakening operating points. This helped in avoiding a lot of time as using the test bench to define the exact operating points meant that running the motor for a wide range of i_d and i_q values, which wastes a lot of energy and time.

Next steps of the project involve using the same workflow methodology to generate a control algorithm for the SESM.

V. Meilensteine

Table I shows the milestones of the project and the status of these milestones.

TABELLE I: milestone table

PSP Nummer	**milestone table**			
	Arbeitspaketname	***FS_Plan***	***FS_Ist***	***FGR***
6.1	Aufbau eines SESM-Modells in MATLAB	28.11.2025	21.04.2026	
6.2	Aufbau Regelungsmodell für die SESM	21.03.2026	21.04.2026	
1.7.1	Fahrzeug-Steuereinheit Test mit 3-Phasige-PMSM	21.02.2026	21.02.2026	
1.7.2	Fahrzeug-Steuereinheit Test mit 5-Phasige-SESM	07.06.2026	07.06.2026	

A. milestone 1 – Aufbau eines SESM-Modells in MATLAB

The ANSYS Model of the SESM has already been developed [3]. It has been used to generate flux maps. However, the dq model of the SESM is not the same as that of a PMSM. So the fundamental equations for SESM in the dq plane are under development and will be finished on 21.04.2026.

B. milestone 2 – Aufbau Regelungsmodell fur die SESM

The SESM will also be driven based on FOC. The MTPA and field weakening equations have already developed in MATLAB for PMSM, but changes are necessary for SESM. The work will go hand in hand with Milestone 1.

C. milestone 3 – Fahrzeug-Steuereinheit Test mit PMSM

The work is almost complete, with some more torque and speed measurements left to develop efficiency maps, which will be done by 21.02.2026.

D. milestone 4 – Fahrzeug-Steuereinheit Test mit SESM

The Dspace RCP workflow used in milestone 3 has helped greatly in understanding the testbench setup for the 5-phase SESM. A testbench setup for the SESM has been developed, and an initial current injection test has been done. The final setup and tests will be done by 07.06.2026.

Literaturverzeichnis

[1] P. M. Garmut M, Steentjes S, "Parameter identification for mtpa control based on a nonlinear d-q dynamic ipmsm model." COMPEL, Vol. 42 No. 4 pp. 846–860, 2023.

[2] B. Dotz and D. Gerling, "Design and experimental validation of a delta connected 36-slot 28-pole permanent magnet machine for hybrid traction applications," in *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2019, pp. 3917–3923.

[3] S. Kamboj, G. Dajaku, and D. Gerling, "Five-phase harmonic-excited synchronous machine for hybrid vehicle application," in *2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe)*, 2023, pp. 1–5.

***Kurzbiographie Autor*— The author obtained his Master's degree in Power Engineering from the Technical University of Munich, Germany, in 2024. Since March 2025, he has been a Research Scientist at the University of the Bundeswehr Munich, working on the project MORE.**

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

ENERGIE & ANTRIEB

Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Klein

Direct Numerical Simulation (DNS) Study on the Primary Atomisation of Water-in-Fuel Emulsion Planar Jets

K. Abo-Amsha and M. Klein

I. Research Focus

The project aims to study the atomisation characteristics of water-in-fuel emulsion jets with varying water volume fraction. These characteristics will also be compared with those in a pure fuel jet. An emulsion is a mixture of two or more immiscible liquids, with one liquid dispersed in the other as a collection of fine droplets [1]. Recent research has explored the use of water-in-fuel emulsions to enhance power generation efficiency and reduce environmental impact. This is the case since the introduction of water droplets into the combustion chamber can lead to enhanced turbulence levels and flame area generation. This enhanced turbulence improves mixing between fuel and oxidiser, and thus increases the efficiency of combustion. Moreover, the evaporation of water droplets near the flame front decreases the combustion temperature, which slows down the thermal NO_x production route [2]. However, the effect of using water-in-fuel emulsions on the injection and atomisation processes, particularly on the jet's primary atomisation characteristics, is not yet fully understood.

Atomisation is a complex process that involves the transformation of a liquid jet into a spray. In a planar liquid jet, atomisation proceeds through an instability-driven cascade, in which interfacial shear between liquid and surrounding gas first excites Kelvin–Helmholtz (KH) waves on the sheet. This instability grows at a rate governed primarily by the liquid and gas Weber numbers, Reynolds number, Ohnesorge number, and density ratio. As these KH waves grow, they steepen and become three-dimensional, forming lobes and corrugations that locally thin the sheet, while secondary mechanisms such as Rayleigh-Taylor type behaviour in accelerated regions and turbulence-induced deformations further enhance three-dimensionality and promote localised rupture of the jet sheet. The thinned regions between wave crests then perforate, creating holes whose rims retract under surface tension and inertia, forming a dynamically evolving network of rims and ligaments along wave crests, hole borders, and sheet edges. These ligaments, stretched by aerodynamic forces, subsequently undergo capillary (Rayleigh–Plateau) breakup into primary droplets. At sufficiently high gas–liquid relative velocity, the larger primary droplets can themselves experience secondary breakup, further refining the spray and leading to a wide droplet size distribution.

A detailed understanding of atomisation characteristics is important since atomisation is crucial for optimising combustion efficiency and reducing emissions. Effective atomisation significantly increases the total free surface area of the fuel, which enhances the rates of vaporisation and fuel-oxidiser mixing and, thus, allows for a more complete combustion in a shorter timeframe. This increases the energy efficiency of engines and helps to reduce harmful emissions [3]. However, the primary break-up phase, which occurs in a dense spray region where the liquid volume fraction is high, is particularly challenging to model. This (spray) density makes it difficult to obtain experimental data, and the physical mechanisms governing this phase are not yet fully elucidated [4]. The complexity of modelling the primary jet breakup is further compounded when dealing with emulsions. The interaction between the immiscible liquids and the resulting three-phase flow adds another layer of complexity. In this context, Direct Numerical Simulation (DNS) can play a crucial role in providing fundamental understanding of flow characteristics in the near-nozzle flow field, as well as the droplet size distribution [5]. Thus, in this project, DNS has been utilised to study the primary atomisation of water-in-fuel emulsion planar jets. The focus is on providing insights into the flow physics and droplet size distribution for emulsion injection. The flow and droplet statistics in the emulsion jet are also compared against those in a pure fuel jet.

II. Methodology

The cases considered here are those of pure fuel, and a water-in-fuel emulsion planar jets. The water-in-fuel emulsions have been chosen such that they comprise approximately 5%, 15%, or 30% water by volume. In all cases, the jet is surrounded by initially stagnant air. The jet height is taken to be H = 0.1 mm, while the computational domain size is 15H×3H×7H in the stream-wise, span-wise and jet normal directions, respectively.

The domain was initialised as stagnant air at a pressure p = 5.0 MPa and temperature T = 300K, which corresponds to air density of ρ_a=58.0 kg/m^3. The effect of liquid evaporation is not considered in this project. The liquid fuel was chosen as a generic hydrocarbon with density ρ_f = 750 kg/m^3, dynamic viscosity μ_f=0.53 mPa·s and surface tension coefficients σ_{f-a}= 0.03 N/m for the fuel-air interface. For water, the density ρ_w= 1000 kg/m^3, dynamic viscosity μ_w=0.85 mPa·s and surface tension coefficient towards air σ_{w-a}= 0.07 N/m have been utilised. The surface tension at the water-fuel interface was taken as σ_{f-w}= 0.01 N/m. The velocity at the inlet was U= 40 m/s, with a turbulence intensity of 5%. Synthetic turbulence was generated using the method developed by Klein et al. [6].

The emulsion field was generated using a modified version of Bridson's Poisson disk sampling algorithm, extended to accommodate droplets with variable radii. A spatial hash grid accelerates the generation of the emulsion field, and rejection sampling ensures non-overlapping droplet placement. The algorithm is designed to achieve a specified droplet volume fraction and radius distribution. Once the droplet distribution (radii and positions) is determined, the field is interpolated onto a computational grid using a smoothed pulse kernel function. The emulsion field in this study has been chosen to be mono-

dispersed with a constant water droplet diameter of D_w= 10 μm.

The required mesh resolution for the DNS was calculated from the Kolmogorov length scale, η, at the inlet. The smallest Kolmogorov length scale was $\eta_{min} \cong 1.0\ \mu m$. The mesh resolution in the near-jet region of the computational domain was chosen to achieve $\Delta_{max}/\eta_{min} \cong 0.75$, which allows for the resolution of the Kolmogorov length scale. The resulting mesh has approximately 287 million cells. The simulation time step is adjusted to maintain the Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) number just below 0.3, which ensured numerical stability and the required temporal resolution without unnecessarily increasing the computational costs. The cases chosen are currently being run using SuperMUC-NG. Preliminary results are presented in the next section.

III. Results 2025

The development of the flow field of a multiphase jet is governed by the interplay between surface tension, inertia, aerodynamic and viscous forces within the various phases.

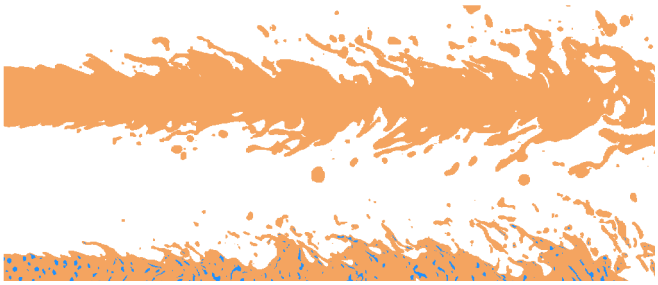


Figure 1: Instantaneous 2D slice through the water-in-fuel emulsion (15% water) and pure fuel jets. The fluids are injected on the left.

Using early simulation snapshots, an illustration of the interaction between the different phases in a pure fuel and an emulsion (water volume fraction of 15%) jets is presented in Fig.1, which shows instantaneous slices through the emulsion and fuel jets. It can be seen from Fig.1 that, as the liquid exits the nozzle and meets the surrounding air, waves start to form at the surface of the jets. These waves are evident from the increasingly corrugated fuel-air interface. As the liquid progresses downstream, it starts to destabilise further, with structures starting to separate from the liquid jet core to form elongated ligaments. As these ligaments get stretched out, their tips separate, forming droplets that are freed from the liquid core and propagate independently, carried by the flow field and affected by their inertia. Moreover, air is entrained into the liquid core and forms bubbles that get engulfed by the liquid structures. These bubbles also contribute to the break-up of the liquid bulk.

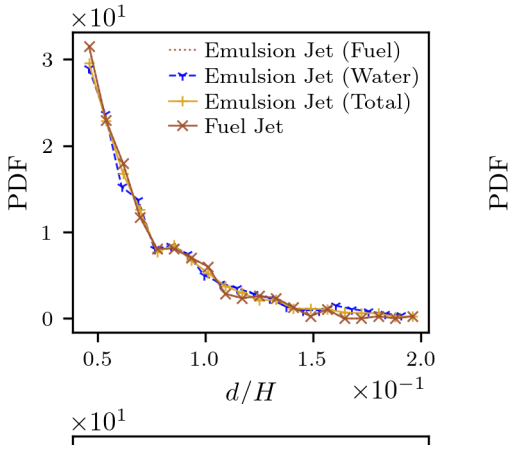


Figure 2: Droplet size distribution in the emulsion and fuel jets at stream-wise location *x/H* = 7.5. *d* is the equivalent spherical diameter of the droplets.

Figure 2 shows PDFs of the droplets' (equivalent spherical) diameter, *d/H*. The statistics are assembled in time at a plane perpendicular to the mean flow direction at an axial distance of *x/H* = 7.5 from the inlet. It can be seen from Fig.2 that the combined droplet size distribution of the emulsion jet corresponds closely to the single-phase fuel jet. This result agrees with the finding of the experiments conducted by Schier et al. [7], where single-liquid jets (water and gasoline, individually) were compared with a water-in-gasoline emulsion jet. Schier et al. [7] observed that, in comparison to that of the pure gasoline jet, the Sauter Mean Diameter (SMD) of the emulsion spray showed minimal variation with increased water content (up to 50% water-to-fuel ratio), despite the significant differences in SMD between the pure water and and pure gasoline jets. Moreover, when comparing the droplet size distribution of the emulsion components, it can be seen from Fig.2 that both water and fuel droplets originating from the emulsion jet have similar diameter distributions to each other and to that shown in the single-phase fuel jet.

IV. Outlook and Next Steps for 2026

The current phase of the project has established a viable and consistent numerical framework for the simulation of a planar jets with water-in-fuel emulsions at water volume fractions of 5%, 15%, and 30%, alongside a pure fuel reference case. All simulations are presently running on LRZ's SuperMUC-NG HPC. Upon completion of the simulations and convergence of temporal averages, the analysis will be extended to time-averaged quantities. These will include mean velocity, Reynolds stresses, and averaged volume fraction fields of the dispersed (water) and continuous (fuel) phases, together with their variances. Droplet size and number density distributions will be evaluated at multiple downstream locations to quantify the spatial evolution of atomisation and phase dispersion. A systematic comparison across water volume fractions will then be performed to isolate the influence of emulsion composition on jet development, turbulence modulation, and breakup characteristics. Further analysis may include conditional statistics based on local volume fraction or droplet size, integral measures such as jet spreading rate and centreline decay, and analysis to assess changes in turbulent scales induced by the dispersed phase. Where appropriate, non-dimensional parameters (e.g. effective Reynolds or

Weber numbers) will be used to support generalisation of the findings. These steps will provide a comprehensive basis for interpreting the role of water content in emulsion jet dynamics and for guiding subsequent modelling or experimental comparisons.

V. REFERENCES

[1] T. Trummler, A. Begemann, E. Trautner, and M. Klein, 'Numerical investigation of the segregation of turbulent emulsions', Physics of Fluids, vol. 34, no. 11, p. 113324, Nov. 2022.

[2] R. Concetti, J. Hasslberger, N. Chakraborty, and M. Klein, 'Effects of Water Mist on the Initial Evolution of Turbulent Premixed Hydrogen/Air Flame Kernels', Energies, vol. 17, no. 18, p. 4632, Jan. 2024.

[3] N. Shlegel, A. Klimenko, and P. Strizhak, 'Determination of integral characteristics of secondary atomization of fuel oil/water emulsion droplets', Fuel, vol. 372, p. 132218, Sep. 2024.

[4] R. Lebas, T. Menard, P. A. Beau, A. Berlemont, and F. X. Demoulin, 'Numerical simulation of primary break-up and atomization: DNS and modelling study', International Journal of Multiphase Flow, vol. 35, no. 3, pp. 247–260, Mar. 2009.

[5] E. Trautner, J. Hasslberger, S. Ketterl, and M. Klein, 'Primary atomization of liquid jets: Identification and investigation of droplets at the instant of their formation using direct numerical simulation', International Journal of Multiphase Flow, vol. 160, p. 104360, Mar. 2023.

[6] M. Klein, A. Sadiki, and J. Janicka, 'A digital filter based generation of inflow data for spatially developing direct numerical or large eddy simulations', Journal of Computational Physics, vol. 186, no. 2, pp. 652–665, Apr. 2003.

[7] L. Schier, B. Blau, C. Heinrich, and M. Klein, 'Experimental analysis of microscopic spray properties of nonstabilized water-in-gasoline emulsions using shadowgraph imaging', AAS, vol. 35, no. 3, 2025.

***Report Authors*:**

Dr Khalil Abo Amsha holds a PhD in Mechanical Engineering from the University of Manchester. Prior to working at UniBw Munich, he has held research positions at the University of Manchester and Newcastle University, where his work focused on high-fidelity numerical simulation of complex fluid flows. His research expertise includes turbulence, multiphase flows, combustion, and heat transfer, with an emphasis on understanding and modelling the underlying physical phenomena.

Prechamber Combustion in Spark Ignition Engines.

Marco Herbert

I. Forschungsschwerpunkt

Zur Untersuchung der Vorkammerverbrennung wird eine gesamtmotorische Simulation eines fremdgezündeten Motors mit Vorkammer durchgeführt. Die Simulation ermöglicht detaillierte Einblicke in die Verbrennungsprozesse anhand hochaufgelöster dreidimensionaler Ergebnisse. Multizyklen Simulationen geben Einblick in die Verbrennungsstabilität.

II. Vorgehensweise

Zu Beginn der Arbeiten stand die Auswahl eines geeigneten Lösers. Die Motorsimulation erfordert zwangsläufig bewegte Gitter, um Kolben und Ventile darstellen zu können. Des Weiteren variieren die Anforderungen an das Gitter im zeitlichen Verlauf der Simulation, da in unterschiedlichen Bereichen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Einlass, Auslass, Zündung etc.) stark unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzgrade vorliegen.

Als Solver wurde CONVERGE CFD gewählt. CONVERGE arbeitet mit Adaptive Mesh Refinement (AMR), wobei ein grobes Basisgitter anhand definierter Kriterien weiter verfeinert werden kann. Damit eignet es sich hervorragend, um die stark schwankenden Anforderungen an das Motorgitter zu berücksichtigen [1].

Um die Berechnungen durchführen zu können, muss zunächst die Geometrie für die Simulation aufbereitet und in die CFD-Umgebung eingepflegt werden. Dazu wurden die Einzelbauteile des Motors zusammengefügt, die Innenkontur extrahiert und Bauteile, für die die Wärmeleitung betrachtet werden soll, vollständig übernommen.

Die exportierte STL-Geometrie wurde im Pre-Processor für die Simulation weiter vorbereitet und Rand- sowie Startbedingungen festgelegt. Für eine erste Simulation wurden Richtwerte für Rand- und Initialbedingungen genutzt. Die Turbulenzmodellierung erfolgt in diesem Fall über das k-ε-Modell. Mittels RANS-Simulation konnten letzte Fehler in der Simulation behoben werden, und ein vollständiger Motorzyklus wurde simuliert.

III. Ergebnisse 2025

Ein Motorzyklus wurde unter Verwendung von RANS-Methoden und vorläufig definierten Randbedingungen simuliert. Im selben Zuge wurde auch die Parallelisierung verbessert, sodass die Simulation mittlerweile auf mehreren Knoten parallelisiert durchgeführt werden kann. Aufgrund der vorläufigen Randbedingungen ergibt eine quantitative Auswertung zum aktuellen Zeitpunkt noch keinen Sinn, qualitative Ergebnisse sehen aber plausibel aus und geben den Weg für die nächsten Schritte frei.

Parallel zur Motorsimulation selbst wurde Grundlagenforschung zur Wasserstoffverbrennung in Bunsenflammen betrieben, deren Ergebnisse in [2] publiziert wurden.

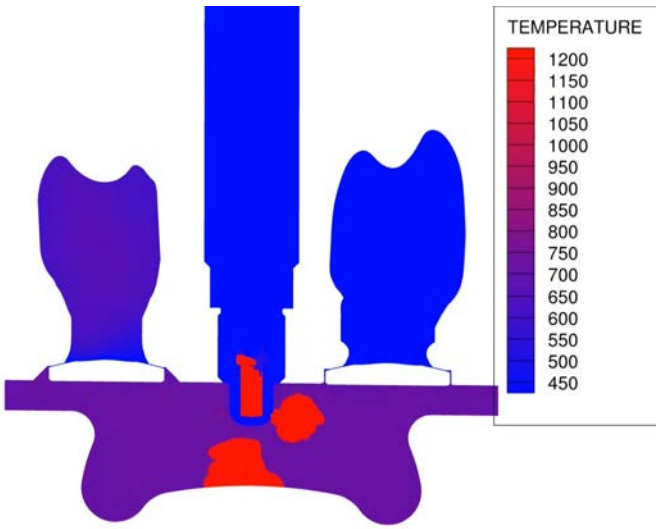


Abbildung 1:Schnitt durch den Motor beim übertritt der Flammenfront aus der Vorkammer in den Brennraum.

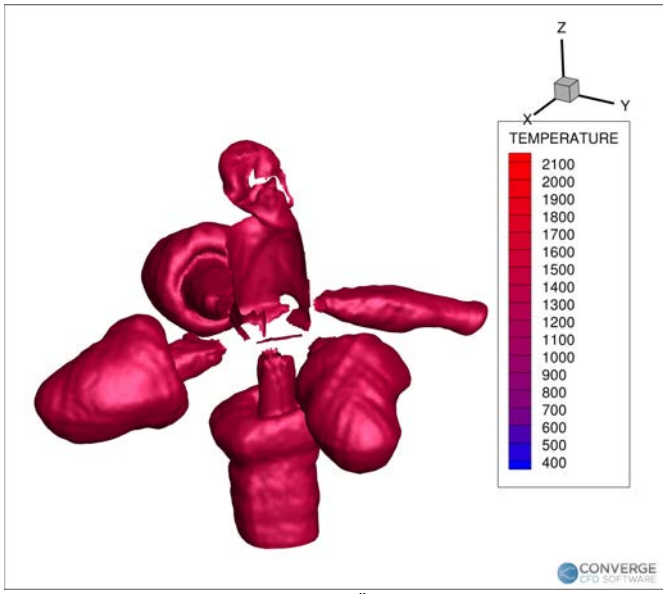


Abbildung 2: 1500K Iso-Kontur beim Übertritt der Flammenfront in den Brennraum

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Für die aktuelle Simulation waren die erforderlichen Versuchs-, Rand- und Startbedingungen unbekannt. Einige

Randbedingungen können durch Messungen aus dem Versuchsmotor bestimmt werden. Insbesondere für den Wärmeübergang ist es notwendig, dass alle Bauteile das korrekte Temperaturprofil aufweisen. Um die Randbedingungen aufeinander abzustimmen sind weitere RANS Simulationen notwendig.

Nach Abschluss der Arbeiten zum Modellaufbau sollen LES Berechnungen durchgeführt werden, um die zyklischen Schwankungen bei der Vorkammerverbrennung zu verstehen.

Literaturverzeichnis

[1] E. Favreau, „https://convergecfd.com,“ ConvergeCFD, 15 08 2024. [Online]. Available: https://convergecfd.com/blog/behind-the-scenes-of-autonomous-meshing-an-interview-with-kelly-senecal.

[2] M. Herbert, O. Chaib, I. Boxx, S. Hochgreb, N. Chakraborty and M. Klein, "Lewis number effects on weakly turbulent premixed Bunsen flames: A comparison between DNS and experimental investigations," *Proceedings of the Combustion Institute*, 2025.

***Kurzbiographie Autor* — Der Author Marco Herbert arbeitet seit April 2025 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für numerische Methoden in der Luft- und Raumfahrttechnik (LRT1.2). Zuvor schloss er seinen Master und Bachelor an der UniBw München ab.**

Utkarsh Pathak and Markus Klein

Numerical Investigations on Reactivity-Controlled Compression Ignition Combustion of Non-Conventional Fuels

I. FORSCHUNGSSCHWERPUNKT

Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) is a promising strategy for internal combustion engines, primarily due to its potential to significantly reduce harmful emissions while maintaining high thermal efficiency. This approach relies on the in-cylinder blending of two fuels that possess distinctly different auto-ignition characteristics. Typically, a low-reactivity fuel (LRF) is introduced into the combustion chamber through port fuel injection, creating a homogeneous mixture with air and recirculated exhaust gases. Subsequently, a high-reactivity fuel (HRF) is directly injected into this mixture to initiate and control the combustion process. By carefully staging the injection and the properties of both fuels, RCCI enables combustion to occur in a low-temperature combustion (LTC) regime, which inherently minimizes the formation of nitrogen oxides (NOx), offers enhanced control over the combustion phasing and the rate at which heat is released [1]. The versatility of RCCI also lies in its ability to effectively utilize a wide array of non-conventional fuels such as ethanol, oxymethylene ethers (OMEs), ammonia, etc., leading to a reduction in the reliance on traditional fossil fuels which are known to contribute significantly to green house gas (GHG) emissions.

Among these, OMEs, with the general formula CH3-O-(CH2-O)$_n$-CH3 for OME$_n$, represent a class of oxygenated fuels that have gained attention as potential substitutes for diesel fuel in combustion engines [2]. The specific properties of OMEs, such as their cetane number, viscosity, boiling point, and oxygen content, vary depending on the chain length. As fuel, OMEs offer several advantages, particularly in terms of emissions reduction. A key benefit is the significant decrease in soot and particulate emissions due to the inherent chemical structure of OMEs, which lack carbon-carbon bonds. This absence of C-C bonds prevents the formation of typical soot precursor molecules during the combustion process. Consequently, OMEs have the potential to mitigate the soot-NOx trade-off - a feature of conventional diesel engines [3]. Furthermore, OMEs can be produced from renewable energy sources, classifying them as sustainable e-fuels. Among different OMEs, mixtures of OME$_3$ to OME$_5$ are often considered the most promising alternatives to diesel fuel due to their similar physical properties. Table I summarizes the advantages and disadvantages associated with each OME, based on which, OME$_3$ is identified as the variant of interest for the present study. OME$_4$ and OME$_5$ exhibit promising chemical properties; however, they are disadvantaged relative to OME$_3$ because of the challenges associated with thier production and handling. OME$_3$ is a HRF and can be used in combination with ammonia for RCCI combustion, which has already been shown as a viable alternative to conventional fuels for medium and large engines [4]–[7]. Apart from the dual-fuel combination of OME$_3$/ammonia, the combination of n-octanol/ethanol appears promising in the context of RCCI combustion [8].

TABELLE I: Comparison of OMEx Variants

OMEx	Advantages	Disadvantages
OME$_1$	Easily produced, good blending, existing industrial use.	Low cetane, high vapor pressure, high formaldehyde emissions.
OME$_2$	Better combustion than OME$_1$, lower soot.	High volatility and high ignition delay.
OME$_3$	Good ignition, reduced soot, compatible with diesel.	Low energy density compared to diesel.
OME$_4$	Good balance between ignition, soot and compatibility.	Complex production process.
OME$_5$	Highest cetane, lowest soot, most diesel-like.	Expensive and solidifies in cold conditions.

The objectives of the present study are twofold: (1) to examine the potential of OME$_3$ as a replacement for diesel, i.e., a high reactivity and/or pilot-fuel for combustion of ammonia, a low reactivity fuel, under direct-injection and port injection (RCCI) conditions; and (2) to extend the insights from direct numerical simulations (DNS) of n-octanol/ethanol mixtures under RCCI conditions reported by Premkumar et al. [9] through additional DNS computations.

II. VORGEHENSWEISE

A. Experimental and simulation setup for numerical investigations to examine the potential of OME$_3$ as a HRF for RCCI combustion of ammonia

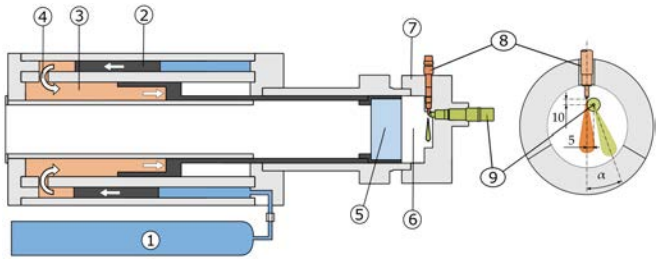


Abb. 1: RCEM pneumatic system and cylinder head: ① driving-air bottles, ② driving piston, ③ hydraulic fluid, ④ flow orifice, ⑤ working piston, ⑥ combustion chamber, ⑦ cylinder head, ⑧ diesel injector, ⑨ ammonia injector.

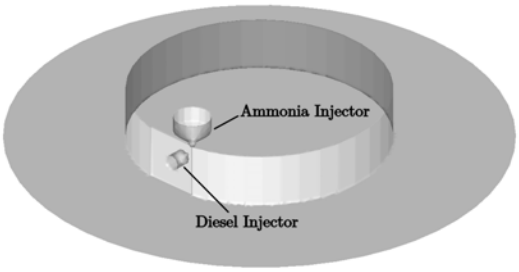


Abb. 2: Three-dimensional model of the RCEM cylinder head

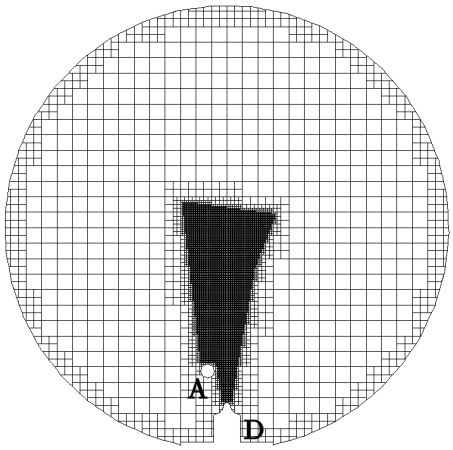


Abb. 3: A cross-section of the computational mesh intersecting the centers of the ammonia (marked A) and diesel (marked D) injector orifices.

Experiments were conducted by Scharl et al. [10] using an RCEM featuring an optically accessible combustion chamber facilitated by a glass piston. The RCEM operates under parameters summarized in Table II. A schematic representation of the RCEM pneumatic system and cylinder head is shown in Fig. 1. The experimental procedure involves initiating pressurized air to accelerate the outer driving piston, subsequently accelerating the inner working piston in the opposite direction via hydraulic fluid coupling. Compression of the charge by the working piston happens until dynamic equilibrium is achieved, prompting the initiation of the expansion phase. The injection of ammonia and diesel is synchronized with the piston position. With an exceedingly low global equivalence ratio ($\sim$ 0.05), the RCEM minimizes the impact of combustion and evaporation on piston trajectory. The separation between the ammonia and diesel nozzles is minimized to mimic the setup typical of an actual engine, where a single injector injects both the fuels. The two sprays converge at an angle $\alpha = -7.5^{\circ}$ in a plane parallel to the piston surface. The heat release rate (HRR) quantifies the chemical heat release resulting from the combustion of diesel and ammonia. It is determined using a multi-zone thermodynamic model, which utilizes piston position and pressure signals for calculation.

The model of the RCEM cylinder head used for the simulations is shown in Fig. 2. The computational fluid

TABELLE II: RCEM operating parameters

Parameter	**Value**
Bore diameter [mm]	220
Equivalent engine rpm [1/min]	1000
TDC temperature [K]	920 ± 10
TDC pressure [bar]	125 ± 2
Diesel injection duration [ms]	0.52
Start of diesel injection [ms bTDC]	2
Diesel nozzle diameter [mm]	0.2
Injected diesel mass [mg]	5
Diesel injection pressure [bar]	2000
Ammonia injection duration [ms]	2.7
Start of ammonia injection [ms bTDC]	1.5
Ammonia nozzle diameter [mm]	0.94
Injected ammonia mass [mg]	210
Ammonia injection pressure [bar]	530

dynamics (CFD) model employed in this study utilizes the CONVERGE software [11], which implements automated meshing. The computational mesh is defined with a base size of 4 mm and allows adaptive mesh refinement (AMR) upto level 4 based on velocity and temperature gradients. After the mesh refinement, the smallest cell size in the entire computational domain is 0.25 mm. In addition to AMR, static mesh refinements are incorporated in the near-boundary region and in the spray-developing region of the ammonia and diesel injectors during the respective fuel injections as shown in Fig. 3. The static mesh refinement level for the former is 1 and for the latter is 4. The maximum cell count is maintained below 4 million. Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations are solved to resolve the mean flow. Turbulence modeling is accomplished using the renormalization group (RNG) k-ε model [12] in conjunction with the Angelberger wall function [13]. Redlich-Kwong [14] equation of state is employed to couple density, pressure, and temperature in the compressible flow field. Transport equations are solved using the pressure-implicit with splitting of operators (PISO) method [15]. The piston movement is modeled as a moving boundary in the numerical model and replicates the piston motion in the validation experiment.

The Lagrangian-Eulerian approach is adopted to model the diesel and ammonia sprays, where liquid droplets are represented in a Lagrangian reference frame while the surrounding gaseous phase is represented in an Eulerian frame [16]. Drop drag due to the coupling between droplets and the gas phase is modeled through the dynamic drag model [17]. Primary breakup utilizes a blob injection method proposed by Reitz and Diwakar [18], where initial droplet size equals the effective nozzle diameter, followed by further breakup and atomization simulated by the Kelvin-Helmholtz (KH) - Rayleigh-Taylor (RT) model [19]. Droplet collision is modeled using the No Time Counter (NTC) method [20], employing stochastic sub-sampling of droplet parcels for faster collision prediction. O'Rourke and Frossling models [21] are utilized to model turbulent dispersion and evaporation of the droplets respectively. The fuel injection profiles utilized

for the simulations are based on the experimental data. The first simulations compare the direct-injection combustion of ammonia using a diesel pilot with the experimental data to validate the CFD model, with subsequent simulations using OME_3 as the pilot-fuel.

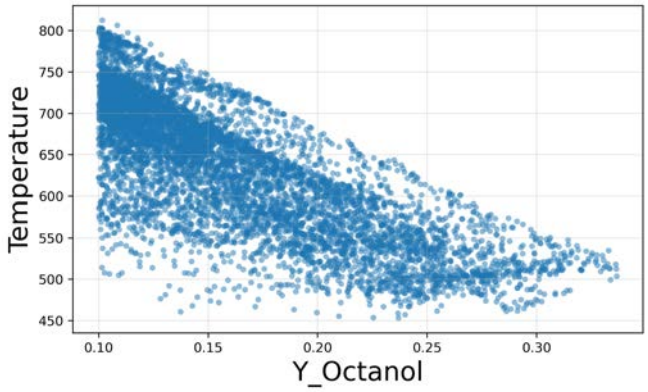


Abb. 4: Mass fraction of n-octanol vs. temperature for the three-dimensional field obtained after direct-injection of n-octanol in the RCCI engine.

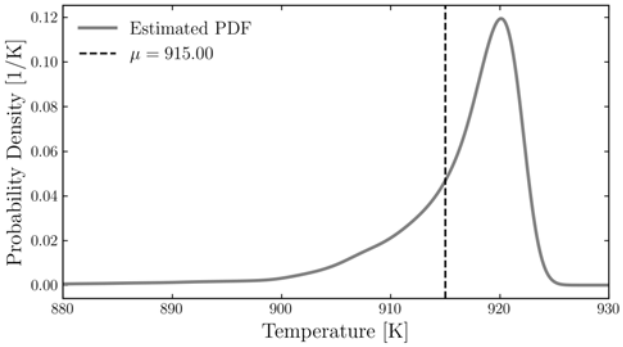


Abb. 5: Probability distribution function for the 2D temperature field.

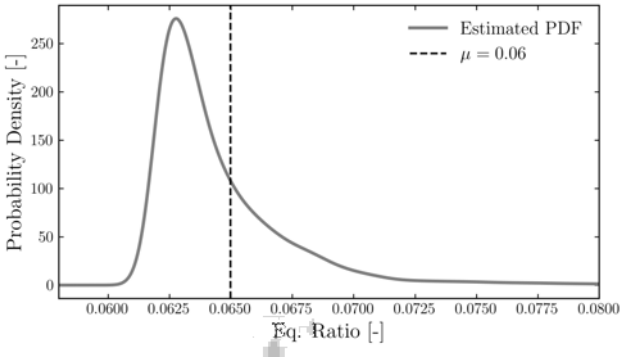


Abb. 6: Probability distribution function for the 2D n-octanol mass fraction field.

B. Simulation setup for two-dimensional direct numerical simulation of n-octanol/ethanol blends in RCCI conditions

A separate set of simulations are setup with the rcciDnsFoam solver. n-octanol/ethanol blends with varying energy contributions are initialized in a 2-dimesional domain along with several negatively correlated (against temperature) log-normal distributions of n-octanol equivalence ratios. The rest of the setup is as described by Premkumar et al. [9]. The negatively-correlated fields, with log-normal distribution, qualitatively correspond to the results obtained by Grundl et al. [22] using three-dimensional simulations of n-octanol/ethanol RCCI combustion, as shown in the fig. 4.

Based on the data, initialization algorithms are updated, and the temperature and n-octanol (mass fraction) fields are initialized with 10% stratification with respect to the mean value, as shown in the figures 5 and 6 for temperature and n-octanol respectively.

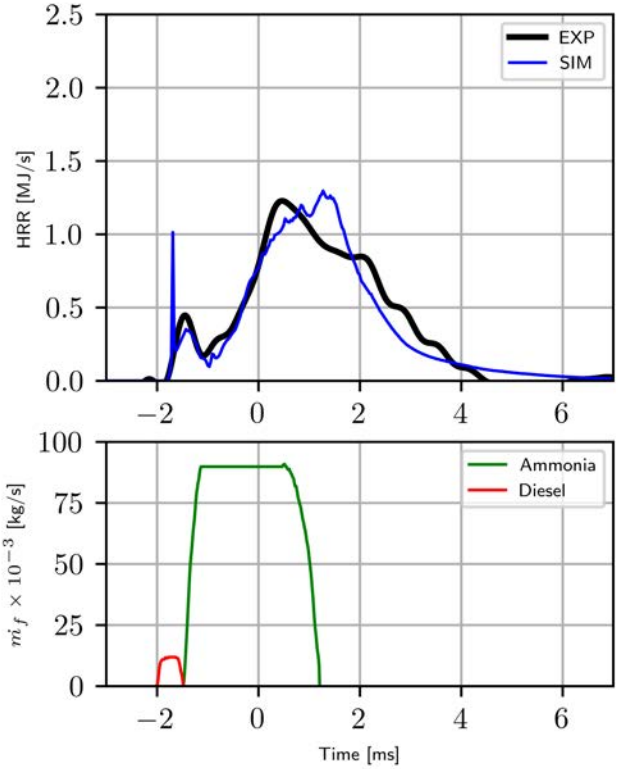


Abb. 7: A comparison between the chemical heat release rate (HRR) computed through simulation and experiments (top) and the mass flow rates $\dot{m}_f$ of injected fuels (bottom).

III. ERGEBNISSE 2025

Dual fuel combustion simulations are conducted using the configuration employed for the evaporating ammonia spray simulations, in conjunction with a detailed chemistry solver. Diesel and liquid ammonia are injected at t=-2 ms and t=-1.5 ms, respectively, to ensure a strong spatial and temporal interaction between the two sprays. Figure 7 compares the

chemical heat release rate (HRR) computed through simulation and experiments, and shows the mass flow rate $\dot{m}_f$ of injected fuels, i.e., diesel and liquid ammonia. The general shape of the HRR curve is predicted well, showing separate peaks corresponding to diesel and ammonia combustion. The timing of diesel pilot combustion is predicted accurately, with a distinct peak observed due to premixed combustion followed by diffusion combustion controlled by fuel-air mixing. Experimental data does not exhibit such peaks due to noise filtration using the Butterworth filter [23] and limited sample rates. The HRR peak due to the diffusion combustion of diesel is slightly lower than the experimental values. This could be partially due to a combination of low sensitivity of the pressure sensor and weak pressure fluctuations due to diesel combustion, which contributes only about 5% of the total LHV of the injected fuel. The end of diesel injection and the start of ammonia injection are practically simultaneous. HRR begins increasing much later than the start of ammonia injection. This indicates ammonia's reluctance to combust when compared to diesel. The model accurately predicts the delay between diesel and ammonia ignition.

Furthermore, a reaction mechanism for OME_3-ammonia combustion is created. It is observed that addition of ammonia to OME_3 increases its ignition delay time, as shown in fig. 8, where E_{NH3} represents the amount of ammonia as a percentage of total lower heating value.

The successfully initialized (stratified) fields for the DNS simulation are obtained as shown in fig. 9 for temperature and fig. 10 for n-octanol. As described in the previous section, there is a negative correlation between the initialized fields, which is apparent from the figures. The figures for other n-octanol/ethanol blends, with varying energy contributions (mass fraction of n-octanol is 10%, 20% and 30%) and stratifications (10% and 20%), are not shown for brevity.

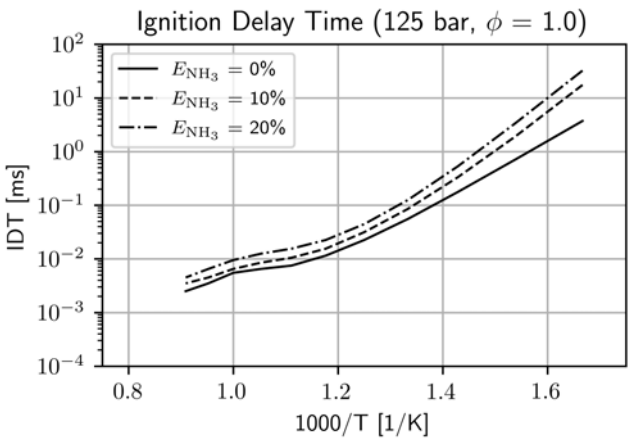


Abb. 8: Ignition delay time for OME_3 and ammonia mixtures.

IV. AUSBLICK UND NÄCHSTE SCHRITTE FÜR 2026

The subsequent steps are defined as follows. First, building on the developed and validated CFD framework, three-dimensional simulations employing OME_3 will be conducted for both direct-injection and port-injection (RCCI) combustion of ammonia to assess the suitability of OME_3 as a pilot and/or high-reactivity fuel. Second, direct numerical simulations will be performed for the successfully initialized n-octanol/ethanol mixtures described previously, with the objective of comparing combustion modes across varying degrees of stratification corresponding to different atomization and mixing conditions in practical engines. Finally, a large-domain simulation of an OME_3–ethanol mixture will be carried out to examine combustion characteristics in greater detail; the computational domain will be comparable to the characteristic length scales observed in real engine configurations.

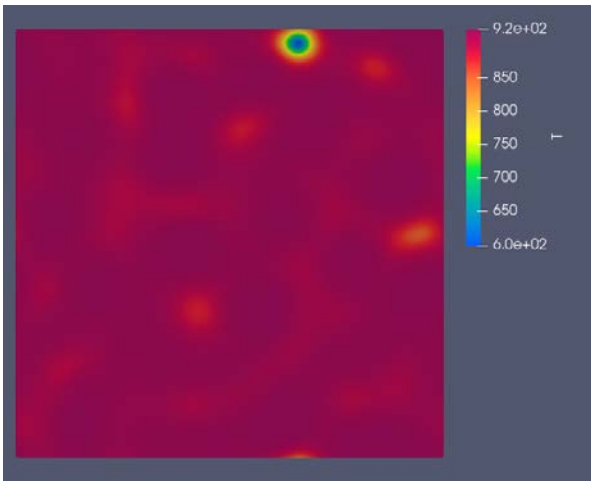


Abb. 9: Stratified two-dimensional temperature field.

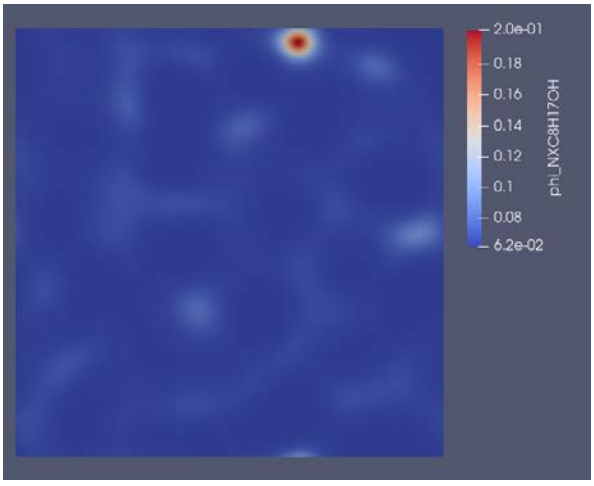


Abb. 10: Stratified two-dimensional n-octanol equivalence ratio field with 10% stratification.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] N. T. Wimer, L. Esclapez, N. Brunhart-Lupo, M. H. de Frahan, M. Rahimi, M. Hassanaly, J. Rood, S. Yellapantula, H. Sitaraman, B. Perry, *et al.*, "Visualizations of a methane/diesel rcci engine using pelec and pelelmex," *Physical Review Fluids*, vol. 8, no. 11, p. 110511, 2023.

[2] H. Pitsch, D. Goeb, L. Cai, and W. Willems, "Potential of oxymethylene ethers as renewable diesel substitute," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 104, p. 101173, 2024.

[3] F. Zacherl, C. Wopper, P. Schwanzer, and H.-P. Rabl, "Potential of the synthetic fuel oxymethylene ether (ome) for the usage in a single-cylinder non-road diesel engine: thermodynamics and emissions," *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 7932, 2022.

[4] A. Valera-Medina, F. Amer-Hatem, A. K. Azad, I. Dedoussi, M. De Joannon, R. Fernandes, P. Glarborg, H. Hashemi, X. He, S. Mashruk, *et al.*, "Review on ammonia as a potential fuel: from synthesis to economics," *Energy & Fuels*, vol. 35, no. 9, pp. 6964–7029, 2021.

[5] A. H. Fakhari, A. Gharehghani, M. M. Salahi, and A. M. Andwari, "Numerical investigation of the hydrogen-enriched ammonia-diesel rcci combustion engine," *Fuel*, vol. 375, p. 132579, 2024.

[6] A. Dupuy, P. Brequigny, A. Schmid, N. Frapolli, and C. Mounaïm-Rousselle, "Experimental study of rcci engine-ammonia combustion with diesel pilot injection," *Journal of Ammonia Energy*, vol. 1, no. 1, 2023.

[7] M. Lang, Y. Su, X. Li, F. Xie, Y. Wang, B. Shen, and Y. Zhang, "Numerical study on the effect of injection strategy on combustion and no emission from different sources in a diesel/ammonia rcci engine," *Energy*, vol. 310, p. 133221, 2024.

[8] P. K. Sundaram, L. M. Grundl, and C. Trapp, "Advancements in combustion modeling and simulation for an innovative homogenous reactivity-controlled compression ignition (hrcci) concept," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2024.

[9] A. Premkumar, F. Loffredo, H. Pitsch, and M. Klein, "Towards direct numerical simulations of reactivity-controlled compression ignition engine using n-octanol/ethanol fuel blends," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 115, no. 1, pp. 275–301, 2025.

[10] V. Scharl and T. Sattelmayer, "Ignition and combustion characteristics of diesel piloted ammonia injections," *Fuel Communications*, vol. 11, p. 100068, 2022.

[11] K. Richards, "Spk and pe. converge manual. converge (version 24) manual," convergent science," *Inc, Madison, Wisconsin, USA*, 2017.

[12] V. Yakhot and S. A. Orszag, "Renormalization group analysis of turbulence. i. basic theory," *Journal of scientific computing*, vol. 1, no. 1, pp. 3–51, 1986.

[13] C. Angelberger, T. Poinsot, and B. Delhay, "Improving near-wall combustion and wall heat transfer modeling in si engine computations," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 1997.

[14] O. Redlich and J. N. Kwong, "On the thermodynamics of solutions. v. an equation of state. fugacities of gaseous solutions." *Chemical reviews*, vol. 44, no. 1, pp. 233–244, 1949.

[15] R. I. Issa, "Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting," *Journal of computational physics*, vol. 62, no. 1, pp. 40–65, 1986.

[16] S. Subramaniam, "Lagrangian–eulerian methods for multiphase flows," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, no. 2-3, pp. 215–245, 2013.

[17] A. B. Liu, D. Mather, and R. D. Reitz, "Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays," *SAE Transactions*, pp. 83–95, 1993.

[18] R. D. Reitz and R. Diwakar, "Structure of high-pressure fuel sprays," *SAE transactions*, pp. 492–509, 1987.

[19] J. C. Beale and R. D. Reitz, "Modeling spray atomization with the kelvin-helmholtz/rayleigh-taylor hybrid model," *Atomization and sprays*, vol. 9, no. 6, 1999.

[20] D. P. Schmidt and C. J. Rutland, "A new droplet collision algorithm," *Journal of Computational Physics*, vol. 164, no. 1, pp. 62–80, 2000.

[21] A. A. Amsden, P. J. O'Rourke, and T. D. Butler, "Kiva-ii: A computer program for chemically reactive flows with sprays," Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), Tech. Rep., 1989.

[22] L. Grundl, P. Sundaram, G. Pang, and C. Trapp, "Alternative combustion concept for a highly phlegmatized hybrid powertrain: Simulation and validation of dual fuel homogeneous charge compression ignition engine using chemical kinetics with 1-d simulation and 3-d cfd software," *Proceedings from 44th International Vienna Motor Symposium*, 2023.

[23] S. Butterworth *et al.*, "On the theory of filter amplifiers," *Wireless Engineer*, vol. 7, no. 6, pp. 536–541, 1930.

***Kurzbiographie Autor*— Utkarsh Pathak obtained a bachelor's in Mech. Engineering from NIT Surat, India. Subsequently, he completed an M.Tech. in Aerospace Engg. at IIT Bombay, India and an M.Sc. in Computational Science and Engineering at TU Munich, Germany. His professional experience includes engineering positions at Ingersoll Rand and research roles at IIT Bombay and TU Munich. At present, he works as a research assistant under Prof. Klein at LRT1.**

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

ENERGIE & ANTRIEB

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Weyh

Gesamtbetriebskosten und externalisierte Kostenbewertung von handelsüblichen Fahrzeugen in Deutschland.

Johannes Buberger

I. Forschungsschwerpunkt

Der Forschungsschwerpunkt befasst sich mit der ganzheitlichen ökonomischen und gesellschaftlichen Bewertung von Pkw-Antriebskonzepten. Untersucht werden die Total Cost of Ownership (TCO) sowie die vollständigen externen Kosten von aktuell in Deutschland verfügbaren Fahrzeugen mit Verbrennungs-, Batterie- und Brennstoffzellenantrieb. Grundlage der Analyse ist eine lebenszyklusbasierte Betrachtung über einen Zeitraum von 16 Jahren unter Verwendung realer Fahrzeug- und Marktdaten. Neben Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten werden auch umweltbezogene sowie fiskalische Externalitäten berücksichtigt. Ziel des Forschungsschwerpunkts ist es, eine fundierte Vergleichsbasis für unterschiedliche Antriebstechnologien zu schaffen und belastbare Entscheidungsgrundlagen für Wissenschaft, Politik und Praxis bereitzustellen.

II. Vorgehensweise

Die Methodik basiert auf einer lebenszyklusorientierten Kostenanalyse real verfügbarer Pkw-Modelle in Deutschland. Insgesamt werden 55 Fahrzeuge aus allen relevanten Fahrzeugsegmenten und mit unterschiedlichen Antriebskonzepten (Benzin, Diesel, batterieelektrisch und Brennstoffzelle) betrachtet. Die Fahrzeuge werden hinsichtlich ihrer technischen Ausstattung harmonisiert, um eine vergleichbare Kostenbasis zu gewährleisten.

Die Berechnung der TCO erfolgt über eine angenommene Fahrzeuglebensdauer von 16 Jahren beziehungsweise 230.000 km. Berücksichtigt werden einmalige Kosten (Anschaffung, Förderungen, Restwert), jährliche Kosten (Steuern, Versicherung, Fördermechanismen) sowie laufleistungsabhängige Kosten (Energie, Wartung und Inspektion). Energie- und Kraftstoffpreise werden auf Basis historischer Daten sowie trendbasierter Extrapolationen angesetzt.

Die externen Kosten werden ergänzend zur TCO-Analyse ermittelt und umfassen Umweltwirkungen wie Treibhausgasemissionen, Luftschadstoffe und Flächenverbrauch. Zusätzlich werden fiskalische Effekte berücksichtigt, indem staatliche Einnahmen aus Steuern als negative externe Kosten in die Bewertung einbezogen werden. Die Emissionsbewertung erfolgt lebenszyklusbezogen unter Verwendung etablierter Umweltkostenfaktoren und eines zeitlich fortgeschriebenen Strommixes.

Alle benötigten Eingangsgrößen werden aus öffentlich zugänglichen Herstellerangaben, amtlichen Statistiken sowie etablierten Datenbanken gewonnen. Durch die Kombination aus realen Fahrzeugdaten, lebenszyklusbasierter Betrachtung und integrierter Bewertung von TCO und externen Kosten wird eine konsistente und vergleichbare Analyse unterschiedlicher Antriebstechnologien ermöglicht.

III. Ergebnisse 2025

Die Ergebnisse wurden in [1] veröffentlicht und zeigen über alle untersuchten Fahrzeugsegmente hinweg ein konsistentes Bild (Abbildung 1). Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) weisen in allen Segmenten die niedrigsten TCO auf, wie beispielsweise in Abbildung 2 zu sehen ist. Dies ist insbesondere auf geringere Energie- und Wartungskosten sowie auf bestehende Fördermechanismen zurückzuführen. Fahrzeuge mit Dieselantrieb verursachen über den Lebenszyklus hinweg die höchsten Gesamtkosten.

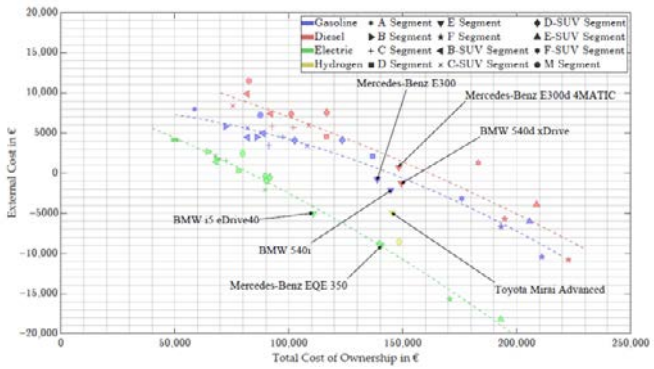


Abbildung 1: TCO and externalisierte Kosten aller Fahrzeuge innerhalb der Studie [1].

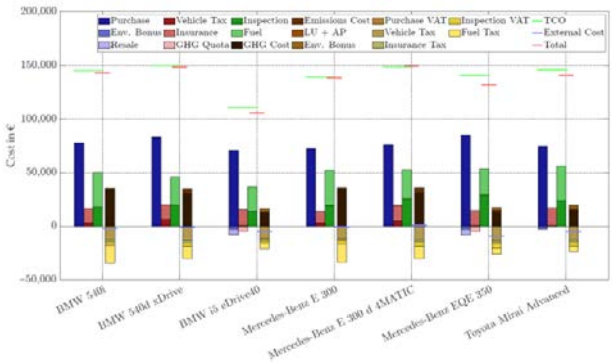


Abbildung 2: Kostenkomponenten für Fahrzeuge innerhalb des E Segments [1].

Auch bei der Bewertung der externen Kosten schneiden BEVs in allen Segmenten am besten ab. Die deutlich geringeren lebenszyklusbezogenen Treibhausgas- und Schadstoffemissionen führen zu substantiell niedrigeren Umweltkosten im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) zeigen ebenfalls günstige externe Kosten, sind jedoch aufgrund

der aktuell begrenzten Marktauswahl und höherer Kosten wirtschaftlich noch eingeschränkt wettbewerbsfähig.

Mit zunehmender Fahrzeugklasse steigen die absoluten TCO zwar an, der Einfluss des Antriebskonzepts auf TCO und externe Kosten ist jedoch größer als der Einfluss des Fahrzeugsegments. In höheren Fahrzeugklassen können hohe Steuer- und Abgabenaufkommen die externen Kosten teilweise kompensieren, ohne jedoch die ökologischen Vorteile emissionsarmer Antriebe aufzuheben.

Die Analyse der Kaufpreise zeigt, dass Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICEV) in den meisten Segmenten niedrigere Basispreise aufweisen als batterieelektrische Fahrzeuge (siehe Abbildung 3). Dieser Unterschied relativiert sich jedoch deutlich, wenn Fahrzeuge mit vergleichbarer technischer und funktionaler Ausstattung betrachtet werden. Während ICEVs häufig mit niedrig motorisierten Varianten und reduziertem Serienumfang angeboten werden, verfügen BEVs in der Regel über eine umfangreichere Serienausstattung und leistungsstärkere Antriebskonfigurationen.

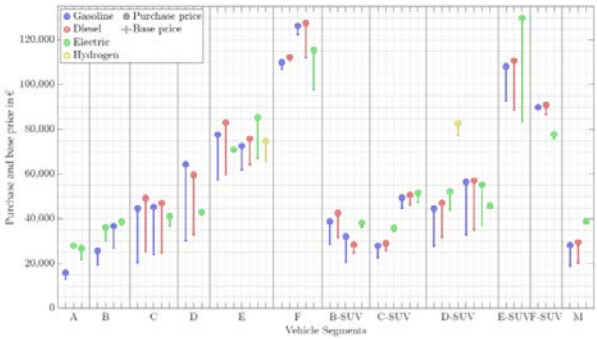


Abbildung 3: Basis- und tatsächliche Kaufpreise für die Fahrzeuge innerhalb der Studie [1].

Werden die Fahrzeuge ausstattungsbereinigt verglichen, liegen die tatsächlichen Anschaffungspreise von BEVs und ICEVs in vielen Segmenten auf einem ähnlichen Niveau; in einzelnen Segmenten sind BEVs bereits gleich teuer oder günstiger. Die verbreitete Wahrnehmung höherer Kaufpreise von BEVs ist somit maßgeblich auf den Vergleich von Basispreisen zurückzuführen und spiegelt nicht die Kosten vergleichbar ausgestatteter Fahrzeuge wider.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass batterieelektrische Fahrzeuge sowohl aus ökonomischer als auch aus gesellschaftlicher Perspektive die vorteilhafteste Antriebstechnologie im aktuellen deutschen Pkw-Markt darstellen.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Die im Forschungsschwerpunkt entwickelten Methoden zur Bewertung von Total Cost of Ownership und externen Kosten sollen im Jahr 2026 gezielt weiterentwickelt werden. Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen ist vorgesehen, die Methodik auf zukünftige Fahrzeuggenerationen zu übertragen und an erwartete technologische, regulatorische und marktseitige Entwicklungen anzupassen.

Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Bewertung von Fahrzeugkonzepten und Antriebstechnologien, die im Rahmen von MORE erforscht und weiterentwickelt werden. Hierzu zählen insbesondere neue elektrische und alternative Antriebskonzepte sowie zugehörige Energiespeicher- und Systemarchitekturen. Die bestehende lebenszyklusbasierte TCO- und Externalitätsanalyse soll hierfür erweitert werden, um technologische Fortschritte, veränderte Kostenstrukturen sowie zukünftige Energie- und Emissionsszenarien angemessen abzubilden.

Ziel ist es, eine konsistente und zukunftsorientierte Bewertungsgrundlage zu schaffen, mit der die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen neuartiger Fahrzeug- und Antriebskonzepte frühzeitig quantifiziert und vergleichbar gemacht werden können.

Literaturverzeichnis

[1] J. Buberger et al., Total Cost of Ownership and External Cost Assessment of Commercially Available Vehicles in Germany, Sustainability, 2026.

***Kurzbiographie Autor* — Johannes Buberger studierte B.Sc. Maschinenwesen mit Schwerpunkt Fahrzeugtechnik und M.Sc. Maschinenwesen mit Schwerpunkt Antriebe und regenerative Energien an der Technischen Universität München. Er arbeitete als Entwicklungsingenieur im Bereich Softwareentwicklung von Fahrzeugbatterien und Schnellladen. Er forscht derzeit an multilevelbasierten rekonfigurierbaren Batteriesystemen im Forschungsprojekt Munich Mobility Research Campus (MORE) an der Universität der Bundeswehr München. Sein Fokus liegt auf bidirektionalem Laden von batterieelektrischen Fahrzeugen, Bilanzierung von Fahrzeugemissionen und neuartigen Steuerungsverfahren.**

Leistungsvergleich eines vollbrückenbasierten rekonfigurierbaren und eines konventionellen Batteriespeichersystems

Julian Estaller

I. Forschungsschwerpunkt

Im Rahmen des Projektes dtec MORE wird am Lehrstuhl für elektrischen Energieversorgung (EIT 1.3, Prof. Weyh) u.a. an rekonfigurierbaren Batteriesystemen als Modulare Multilevel Umrichter (MMC) für automobile Anwendungen geforscht. Neben der Möglichkeit, diese Batteriesysteme als Direktumrichter (Output: AC, dreiphasig) auszulegen, besteht auch der Ansatz, eine Konstantspannung auszugeben, die im Gegensatz zum Stand der Technik regelbar ist. Dieser Ansatz wurde in Zusammenarbeit mit Dr. Dominic Karnehm (ETTI 2, Prof. Neve) simulativ und experimentell untersucht, sowie eine Veröffentlichung dazu verfasst [1].

In konventionellen Elektrofahrzeugen besteht der Batteriespeicher aus fest verschweißten Batterizellen, deren Packspannung mit dem SOC entlang der Entladekennlinie absinkt. Bei konstanter Leistungsabgabe führt die sinkende DC-Spannung zu steigenden Strömen, was Alterung, thermische Auslegung und ohmsche Verluste verschärft. Die regelbare DC-Quelle unterscheidet sich dadurch, dass sie ihre Ausgangsspannung durch dynamisches Zu- und Wegschalten weiterer Zellen in Serie aktiv konstant hält, realisiert über Module mit Bypass/Seriellzuständen. Diese Schaltzustände können über Halbleiter-Schalter (i.d.R. MOSFETs) eingestellt werden.

Die potenziellen Vorteile dieses Ansatzes liegen vor allem in geringeren Stromspitzen und einem reduzierten RMS-Strom bei gleicher Leistungsanforderung, was Effizienz, Batterielebensdauer, thermisches Management und nutzbare Kapazität verbessert. Zudem ist das RBS besonders attraktiv, wenn parasitäre Widerstände (z. B. Leitungen/Kontakte) relevant sind, weil sich dann die Stromreduktion direkt in weniger Verlustleistung übersetzt. Potenzielle Nachteile liegen in den Zusätzlichen kosten für die Halbleiter, sowie in der gesteigerten Komplexität gegenüber konventionellen Batteriespeichern für Elektroautos.

II. Vorgehensweise

Die Vorgehensweise basiert auf einem vergleichenden Systemansatz zwischen einem konventionellen Batteriespeicher und einer regelbaren DC-Quelle mit rekonfigurierbarer Zellverschaltung. Zunächst wird für beide Konzepte ein identischer Betriebsfall mit vorgegebener Leistungsanforderung betrachtet. Beim konventionellen System folgt die DC-Spannung dem Ladezustand der Batterie, während beim regelbaren System die Ausgangsspannung durch dynamisches Serienschalten von Submodulen konstant gehalten wird. Darauf aufbauend werden Ströme, RMS-Werte und Verluste entlang von Lastprofilen analysiert. Die Bewertung erfolgt sowohl simulativ (Matlab/Simulink) als auch experimentell, um Effizienzunterschiede und systemische Auswirkungen quantifizierbar darzustellen.

Der experimentelle Aufbau umfasst einen modularen Batteriespeicher mit mehreren identischen Vollbrücken-Modulen, die jeweils eine Batteriezelle abbilden und gezielt in Serie geschaltet oder überbrückt werden können. Die Last wird durch einen elektrischen Antrieb bzw. einen leistungselektronischen Prüfstand repräsentiert, der reproduzierbare Leistungsprofile vorgibt. Strom- und Spannungsmessungen erfolgen hochauflösend auf DC-Seite, sodass Momentan-, Mittel- und RMS-Werte erfasst werden können. Durch den Vergleich identischer Lastzyklen für beide Konzepte lassen sich die Effekte der Spannungsregelung isoliert und die Verluste sowie Effizienzunterschiede experimentell validieren.

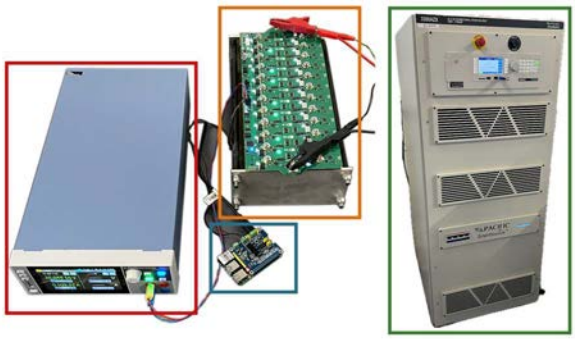


Abbildung 1: Versuchsaufbau mit rekonfigurierbarem Batteriesystem (orange), Controller (blau), Stromquelle (rot) und programmierbare Last (grün).

Der Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Das betrachtete Batteriesystem verwendet prismatische Li-Ion-NMC-PHEV2-Zellen mit einer Nennspannung von 3,7 V und einer Kapazität von 25 Ah je Zelle. Der experimentelle RBS-Aufbau umfasst insgesamt 12 Zellen, die jeweils einem Full-Bridge-Submodul zugeordnet sind. Zum Vergleich dient ein konventionelles 6S1P-Pack mit sechs Zellen. Die regelbare DC-Quelle hält eine konstante Ausgangsspannung von 24 V über den gesamten Entladebereich (2,8–4,0 V Zellspannung). Die Versuche wurden bei Leistungsniveaus von 250 W, 500 W und 1 kW durchgeführt.

III. Ergebnisse 2025

Die Ergebnisse zeigen, dass die regelbare DC-Quelle den RMS-Strom im Vergleich zum konventionellen Batteriesystem um etwa 9,5 % bis 11,3 % reduziert, abhängig vom Lastprofil. Dadurch sinken die ohmschen Verluste auf der DC-Seite um rund 15 % bis 20 %. Die zusätzlich auftretenden Schaltverluste der Submodule liegen deutlich darunter, sodass sich insgesamt ein messbarer Effizienzgewinn ergibt. Besonders ausgeprägt

sind die Vorteile bei dynamischen Lasten und höheren parasitären Widerständen. Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 2 dargestellt.

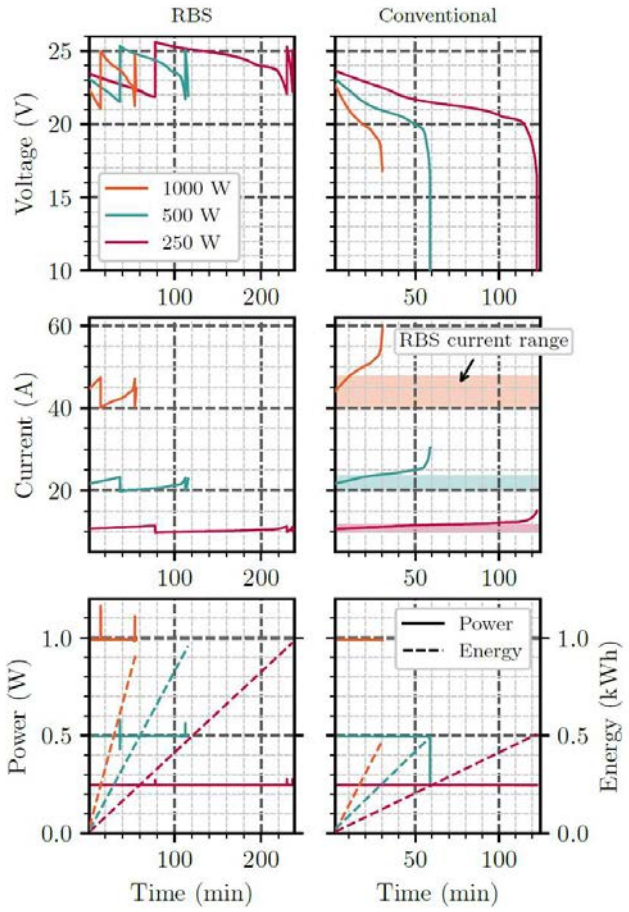


Abbildung 2: Gemessene Spannung, Stromstärke, Leistung und Energie über die Zeit von RBS- und konventionellem System bei 1000 W (orange), 500 W (cyan) und 250 W (rot).

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Für weitere Untersuchungen wäre ein nächster Schritt, das Konzept auf ein realitätsnäheres BEV-Antriebsstrangniveau (z. B. 400 V) zu skalieren und die Gesamteffizienz inkl. Traktionsumrichter, Motor, HV-Verkabelung, EMV-Filter und Bordnetz-Wandler im Fahrzyklus (WLTP/Real-Drive) zu bewerten. Parallel sollte man ein thermisch-elektrisches Alterungsmodell aufsetzen und experimentell validieren, um den Einfluss der reduzierten RMS-/Spitzenströme auf Degradation, Innenwiderstandszunahme und nutzbare Kapazität quantifizieren zu können. Wichtig sind außerdem Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalysen (Fehlerschalterzustände, Zellfehler, Kurzschluss-/Arc-Fault-Szenarien) sowie eine Optimierung von Regelung, Balancingfrequenzen und Schaltstrategien zur Minimierung der Zusatzverluste. Ergänzend bietet sich eine techno-ökonomische Bewertung an (Bauteilkosten, Packaging, Wirkungsgradgewinn vs. Mehrkomplexität) und ein Vergleich verschiedener Topologien (z. B. mit Seriell/Parallel-Rekonfiguration) inklusive Kriterien wie Serviceability und Funktionale Sicherheit.

V. Literaturverzeichnis

[1] D. Karnehm, J.Estaller et al.: "Performance Comparison of a Full-Bridge Based
Reconfigurable and Conventional Battery Storage
System.", IEEE 34th International Symposium on Industrial
Electronics (ISIE), 2025.

***Kurzbiographie Autor* — Julian Estaller, *1994 in München, absolvierte sein Maschinenbau Studium an der Technischen Universität München und der Deakin University in Melbourne mit einem Bachelor-Abschluss im Jahr 2017 und einem Master-Abschluss im Jahr 2020. Während seines Studiums konzentrierte er sich auf Themen aus dem Bereich der Elektromobilität und war Teil des Forschungsprojekts Speed4E, welches die Entwicklung eines Hochdrehzahl-Antriebs für Elektrofahrzeuge zum Ziel hatte. Nach seinem Masterstudium begann er seine Promotion im Projekt dtec MORE an der Universität der Bundeswehr München. Seine Forschung konzentriert sich auf Modulare Multilevel Direktumrichter für Elektrofahrzeuge.**

EMI- und Verlustreduktion durch DC-Link-Optimierung für batterie-basierte Modular-Multilevel-Inverter (BM3/BI-MMC)

Wolfgang Grupp M.Sc. | EIT 1.3

I. Forschungsschwerpunkt

Im Mittelpunkt der aktuellen Forschungsaktivitäten steht die ganzheitliche Weiterentwicklung von Steuerungs- und Regelungskonzepten zur flexiblen Integration modularer Multilevel Converter (MMC) in batterieintegrierte Antriebssysteme. Aufbauend auf der modularen Grundstruktur der MMC werden dabei nicht nur softwareseitige Regelungsansätze, sondern zunehmend auch die leistungselektronische Ausgestaltung der Submodule adressiert.

Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der adaptiven Auslegung zentraler Submodulparameter, insbesondere der DC-Link-Struktur, um eine robuste Anpassung an unterschiedliche Batteriezell- und Modulkonfigurationen zu ermöglichen. Die im Projekt erzielten Forschungsergebnisse zeigen, dass durch eine gezielte Optimierung der DC-Link-Kapazität sowohl elektromagnetische Störeinflüsse als auch Schaltverluste signifikant reduziert werden können, ohne die funktionale Flexibilität des Gesamtsystems einzuschränken.

Diese Kombination aus regelungstechnischer Adaptivität und hardwareseitiger Optimierung stellt einen wesentlichen Fortschritt gegenüber bisherigen MMC-Integrationsansätzen dar. Sie leistet einen zentralen Beitrag zur Effizienzsteigerung, zur Erhöhung der Systemzuverlässigkeit sowie zur potenziellen Verlängerung der Batterielebensdauer und unterstreicht damit die strategische Relevanz des Gesamtprojekts für zukünftige batterieintegrierte Leistungselektroniksysteme.

II. Vorgehensweise

Die Vorgehensweise im Berichtsjahr 2025 basiert auf einem systemorientierten und iterativen Forschungsansatz, der regelungstechnische Entwicklungen, leistungselektronische Auslegung und experimentelle Absicherung eng miteinander verzahnt. Ausgangspunkt bildete eine strukturierte Analyse bestehender MMC-basierter Batteriesysteme, um relevante Freiheitsgrade für eine flexible und skalierbare Integration in unterschiedliche Batteriearchitekturen zu identifizieren.

Darauf aufbauend wurden bestehende Steuerungs- und Regelungskonzepte gezielt erweitert, um eine adaptive Nutzung der modularen Topologie zu ermöglichen. Neben der softwareseitigen Betrachtung rückten zunehmend auch hardwareseitige Einflussgrößen in den Fokus. Insbesondere die Auslegung der DC-Link-Struktur auf Submodulebene wurde systematisch untersucht, da sie einen wesentlichen Einfluss auf Schaltverluste, elektromagnetische Emissionen und das dynamische Systemverhalten besitzt.

Die Bewertung der entwickelten Ansätze erfolgte zunächst simulationsgestützt mithilfe vereinfachter, parasitenbehafteter Modelle, die eine effiziente Untersuchung von Parameterabhängigkeiten erlauben. Auf dieser Basis wurden vielversprechende Konfigurationen identifiziert und anschließend durch experimentelle Untersuchungen an Submodul-Demonstratoren validiert.

Dieses mehrstufige Vorgehen stellt sicher, dass sowohl regelungstechnische als auch hardwareseitige Optimierungen konsistent aufeinander abgestimmt werden. Gleichzeitig ermöglicht es eine belastbare Einordnung der Ergebnisse im Kontext des Gesamtprojekts und schafft die Grundlage für eine spätere Übertragung auf vollständige batterieintegrierte Multilevel-Systeme.

Ergänzend wurde im Berichtsjahr ein besonderer Fokus auf die systematische Parametervariation und Sensitivitätsanalyse gelegt, um den Einfluss zentraler Entwurfsgrößen auf das Gesamtverhalten des Systems zu quantifizieren. Insbesondere die Abhängigkeiten zwischen DC-Link-Auslegung, parasitären Effekten und schaltbedingten Emissionen wurden gezielt untersucht. Diese Vorgehensweise ermöglichte es, allgemeingültige Auslegungsrichtlinien abzuleiten, die über einzelne Prototypkonfigurationen hinausgehen und eine robuste Übertragbarkeit der Ergebnisse auf unterschiedliche Multilevel-Topologien und Anwendungsszenarien gewährleisten.

III. Ergebnisse 2025

Im Berichtsjahr 2025 konnten im Rahmen des Gesamtprojekts wesentliche Fortschritte bei der Weiterentwicklung batterieintegrierter Multilevel-Antriebssysteme erzielt werden. Die Ergebnisse belegen sowohl auf System- als auch auf Submodulebene den Mehrwert der kombinierten regelungs- und hardwareseitigen Optimierungsansätze.

Ein zentraler Schwerpunkt lag auf der gezielten Auslegung der Submodul-DC-Link-Struktur in batterieintegrierten Modular Multilevel Converters. Aufbauend auf simulationsgestützten Analysen und experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die bisher übliche energetische Skalierung der DC-Link-Kapazität deutlich konservativ ist. Durch eine optimierte Dimensionierung lassen sich die Schaltverluste der Leistungshalbleiter signifikant reduzieren, während gleichzeitig die spektrale Verteilung der Gleichtaktspannungen gezielt in niedrigere Frequenzbereiche verschoben wird. Dies führt zu einer deutlichen Reduktion elektromagnetischer Störeinflüsse bei gleichbleibender funktionaler Flexibilität des Multilevel-Systems.

Parallel dazu bestätigten die Untersuchungen am Power-Train-HiL-Prüfstand die systemischen Vorteile des Multilevel-Ansatzes. Die Ergebnisse zeigen eine verbesserte Gesamtwirkungsgradbilanz sowie eine signifikante Reduktion der Total Harmonic Distortion im Vergleich zu konventionellen Zwei-Level-Topologien. Diese Effekte wirken sich positiv auf die thermische und elektrische Belastung der Komponenten aus und bilden eine wichtige Grundlage für langlebige und effiziente Antriebssysteme.

Die Kombination aus modularer Topologie, adaptiver Regelung und optimierter Submodulhardware erweist sich damit als wirkungsvoller Ansatz zur gleichzeitigen Verbesserung von Effizienz, EMV-Verhalten und Systemzuverlässigkeit. Die erzielten Ergebnisse unterstreichen die strategische Relevanz des Projekts und schaffen eine belastbare Basis für die Übertragung der entwickelten Konzepte auf vollständige batterieintegrierte Multilevel-Antriebssysteme..

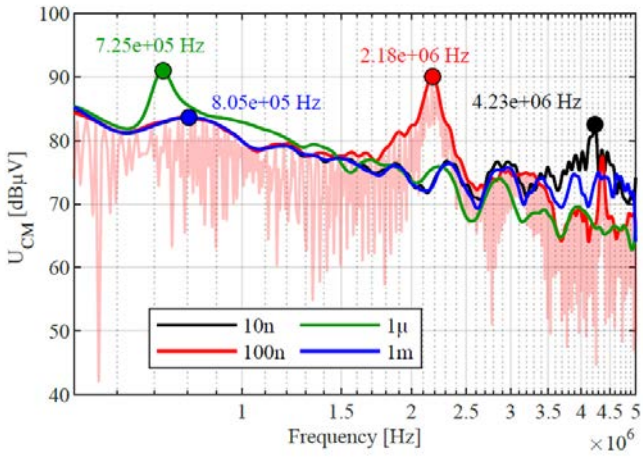


Abbildung 1: Bode-Diagramm der Gleichtaktspannung UCM verschiedene Zwischenkreiskapazitäten

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Nach Abschluss des Berichtsjahres 2025 befindet sich das Projekt an der Schnittstelle zwischen forschungsgetriebener Entwicklung und anwendungsnaher Umsetzung. Die im Laufe des Jahres vorbereitete Markteinführungsphase des Energiespeichersystems wurde durch mehrere Pilotprojekte mit Industriepartnern flankiert, in denen die Integration in batterieelektrische Fahrzeuge, industrielle Energiesysteme sowie mobile Stromversorgungslösungen unter realen Betriebsbedingungen erprobt wurde. Parallel dazu wurden die wesentlichen Schritte der Zertifizierung umgesetzt, um die Einhaltung internationaler Sicherheits-, Effizienz- und Umweltstandards sicherzustellen.

Im Bereich der elektrischen Antriebssysteme konnten die am Power-Train-HiL-Teststand gewonnenen Erkenntnisse erfolgreich in den institutseigenen Versuchsträger übertragen werden. Die dort durchgeführten Untersuchungen bestätigten die im Labor beobachteten Effizienz- und EMV-Vorteile des optimierten Multilevel-Antriebsstrangs und lieferten wertvolle Rückmeldungen zur Praxistauglichkeit der entwickelten Konzepte. Damit wurde eine belastbare Grundlage für weiterführende Skalierungs- und Integrationsarbeiten geschaffen.

Die im Projekt entwickelten Modelle zur DC-Link-Optimierung und zur Analyse von Gleichtaktstörungen erwiesen sich als geeignet, um auch komplexere Systemzusammenhänge abzubilden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden konzeptionelle Erweiterungen vorbereitet, die eine Übertragung auf höhere Spannungsniveaus sowie auf weitere Umrichtertopologien ermöglichen. Insbesondere die Kombination aus adaptiver Regelung, optimierter Submodulhardware und systematischer EMV-Betrachtung stellt einen vielversprechenden Ansatz für zukünftige Multilevel-Antriebssysteme dar.

Insgesamt bilden die im Berichtsjahr abgeschlossenen Arbeiten eine solide Basis für nachfolgende Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich batterieintegrierter Leistungselektronik. Die erzielten Ergebnisse tragen dazu bei, Effizienz, elektromagnetische Verträglichkeit und Skalierbarkeit elektrischer Antriebssysteme nachhaltig zu verbessern und leisten damit einen Beitrag zur Weiterentwicklung von Elektromobilität und energieeffizienten Energiesystemen.

V. Literaturverzeichnis 2025

[1] W. Grupp, “EMI and Loss Reduction via DC-Link Optimization for Battery Based BI-MMC,” Proc. IPEC, 2026.

[2] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, “A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter,” IEEE Trans. Ind. Appl., 1981.

[3] H. Akagi, “Classification, Terminology, and Application of the Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC),” IEEE Trans. Power Electron., 2011.

[4] R. W. Erickson and D. Maksimović, Fundamentals of Power Electronics, 2nd ed. Springer, 2001.

***Kurzbiographie Autor* — Wolfgang Grupp, M.Sc., absolvierte 2015 seinen Bachelor in Elektromobilität und setzte seine akademische Laufbahn an der TU Chemnitz fort, wo er 2017 seinen Masterabschluss in Energiesystemen erfolgreich abschloss. Seit 2021 forscht er an der Universität der Bundeswehr München im Bereich Leistungselektronik für Multilevel Batterien, wodurch er aktiv zur Entwicklung nachhaltiger Energiespeicherlösungen beiträgt.**

Vergleichende Analyse eines modularen Mehrstufenwechselrichters (BM3) mit einem Zweistufenwechselrichter (SVPWM).

Tobias Manfred Högerl

I. Forschungsschwerpunkt

Der Schwerpunkt der im Folgenden beschriebenen Forschung besteht in der inverterbedingten Zusatzverluste in Axialfluss- permanentmagneterregten Synchron Maschine (AFPM). Diese Maschinen werden zunehmend in elektrischen Fahrzeugantrieben eingesetzt, da sie aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte und kompakten Bauform besonders vorteilhaft sind. Ein zentrales Ziel ist es, den Einfluss moderner Multilevel-Inverter (MLI) auf das Verlustverhalten der Maschine präzise zu bestimmen. MLI erzeugen nahezu sinusförmige Spannungsverläufe, wodurch sich Oberschwingungen, Stromverzerrungen und zusätzliche thermische Belastungen reduzieren lassen. Der Fokus liegt darauf, wie sich diese verbesserte Spannungsqualität auf Kupfer-, Eisen-, Wirbelstrom- und Zusatzverluste auswirkt und in welchem Umfang sich daraus Effizienzsteigerungen für elektrische Antriebe ergeben. Besonderes Interesse gilt dabei dem Betrieb in realitätsnahen Fahrzuständen, da gerade wechselnde Drehzahlen und Lastpunkte typische Belastungsszenarien in Elektrofahrzeugen darstellen.

II. Vorgehensweise

Zur Untersuchung wurde ein vollständiges dreidimensionales FEM-Modell einer Axialfluss-PMSM aufgebaut, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht g efunden werden.** zu sehen, dass den realen elektromagnetischen Aufbau präzise und möglichst realitätsnah abbildet.

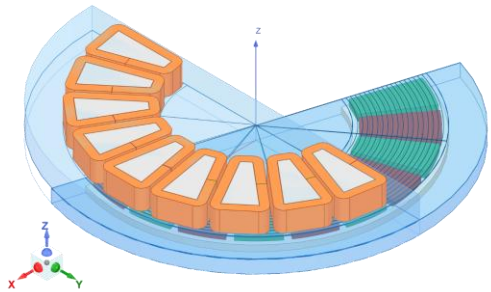


Abbildung 1: Schnitt durch die X/Y-Ebene des Modells EMRAX 268 MV [1].

Die Maschine wurde über verschiedene Drehzahlbereiche simuliert, um sowohl niedrige Geschwindigkeiten mit hohen Drehmomentanforderungen als auch Hochdrehzahlbetriebspunkte zu berücksichtigen. In den Simulationen wurden Stromprofile eingespeist, die typische Antriebszustände repräsentieren. Das Modell erlaubt die getrennte Analyse von Kupferverlusten, Eisenverlusten, Wirbelströmen und nichtlinearen Zusatzverlusten, die insbesondere durch Oberschwingungen und steile Strom-anstiege entstehen. Besondere Aufmerksamkeit galt dabei den dynamischen Verlustmechanismen in Magneten, Blechen und Wicklungen. Vergleichend dazu wurde der Einfluss klassischer Zwei-Level-Inverter simuliert, um die Verlust-entwicklung der Maschine unter den beiden Inverter-technologien direkt vergleichen zu können. Die Simulations-ergebnisse wurden zudem mit typischen Verlustentwicklungen in modernen elektrischen Maschinen abgeglichen, um die Ergebnisse einzuordnen und auf ihre Übertragbarkeit in reale Antriebssysteme zu prüfen.

III. Ergebnisse 2025

Die durchgeführten Simulationen zeigen deutlich, dass Multilevel-Inverter die Stromoberschwingungen über den gesamten Drehzahlbereich hinweg reduzieren. Besonders bei höheren Drehzahlen bleibt die harmonische Verzerrung des Phasenstroms niedriger, was zu deutlich geringeren Eisen- und Wirbelstromverlusten führt. Die resultierenden Gesamtverluste, dargestellt in Tabelle 1, der Maschine sinken abhängig vom Betriebspunkt um rund acht bis elf Prozent.

Tabelle 1: Daten der Verlustanteile.

	n [rpm]	$P_{\mathrm{L,mli}}$ [W]	$P_{\mathrm{L,SVPWM}}$ [W]
Copper	500	1479.3	1568.4
	2500	1542.2	1537.0
	4500	1540.7	1550.8
Hysteresis	500	16.0	17.8
	2500	81.3	79.1
	4500	146.4	142.9
Eddy Current	500	5.5	58.3
	2500	138.4	309.2
	4500	447.6	586.4
Excess	500	9.4	38.7
	2500	106.5	183.6
	4500	256.9	318.6
$\sum$	500	1510.2	1683.1
	2500	1868.4	2108.8
	4500	2391.6	2598.6
%	500	10.3 %	
	2500	11.4 %	
	4500	8.0 %	

Während die Reduktion der Kupferverluste moderat ausfällt, zeigen sich die größten Effekte bei den dynamisch geprägten Verlustanteilen im Weicheisenkern und in den Magneten.

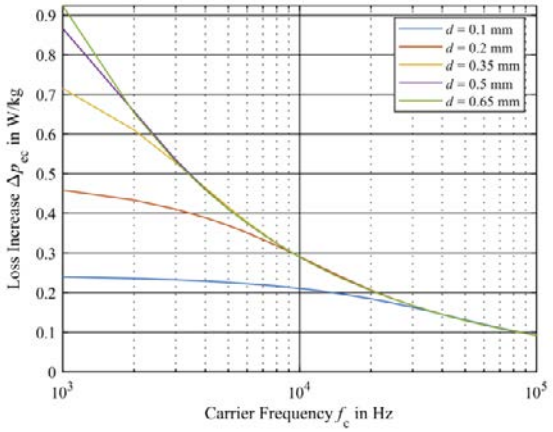


Abbildung 2: Analytisch berechnete, durch PWM verursachte, zusätzliche Wirbelstromverluste bei unterschiedlichen Weicheisenblechdicken *d* [2].

Die geringere Verzerrung der Ströme führt zu einer gleichmäßigeren magnetischen Belastung des Blechpakets, einer reduzierten lokalen Sättigung und einer spürbaren Abschwächung domänenbasierter Verluste. Darüber hinaus verbessert sich das thermische Verhalten der Maschine, da kritische Hotspots in Magneten und Weicheisenkern weniger ausgeprägt auftreten. Dies wirkt sich positiv auf die Lebensdauer der Isolation, die Materialbelastung und die Betriebszuverlässigkeit aus. Insgesamt zeigt sich, dass die Maschine mit einem Multilevel-Inverter nicht nur geringere elektrische Verluste aufweist, sondern auch ein stabileres thermisches und mechanisches Verhalten zeigt.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Für das kommende Jahr ist die Überführung der Simulationsergebnisse in einen realen Prüfstandsbetrieb geplant. Es sollen experimentelle Messungen sowohl an der AFPM als auch an verschiedenen MLI-Topologien durchgeführt werden, um die identifizierten Verlustmechanismen unter realen Bedingungen zu validieren. Zusätzlich werden alternative Modulationsstrategien untersucht, die das Potenzial besitzen, Oberschwingungen weiter zu reduzieren und gleichzeitig die Schaltverluste in den Halbleitern gering zu halten. Ein weiterer Fokus liegt auf der modellbasierten thermischen Bewertung der Maschine, insbesondere hinsichtlich der Verluste in Permanentmagneten und elektrisch leitfähigen Strukturelementen. Auch eine Erweiterung der Untersuchungen auf andere Motortopologien und Anwendungen im Bereich der Elektromobilität ist vorgesehen, um die erzielten Erkenntnisse breiter nutzbar zu machen. Ziel ist es, eine belastbare Grundlage für die Auslegung zukünftiger hocheffizienter Antriebssysteme zu schaffen.

V. Literaturverzeichnis

[1] T. M. Högerl, J. Estaller, J. Buberger, W. Grupp, A. Wiedenmann, N. Sorokina, W. Bliemetsrieder, S. Pohlmann, R. Christian, M. Kuder und T. Weyh, „Comparative Loss Analysis of an Axial-Flux PMSM Fed by a Modular Multilevel Inverter (BM3) Versus a Two-level Inverter (SVPWM).," in *The 26th European Conference on Power Electronics and Applications.*, Paris, 2025.

[2] L. Gallus, T. Högerl, T. Weyh und P. Jürgen, „A Review of Inverter Induced Losses in Electrical Machines," in *ETG-Fb. 177: Antriebssysteme 2025*, München, 2025.

[3] C. Groß, Projektmanagement, München: München Verlag, 2024.

***Kurzbiographie Autor* — Tobias Högerl (M.Sc.) schloss sein Bachelorstudium in Elektrotechnik / Elektromobilität an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München ab. Seine Bachelorarbeit im Labor für Energiespeicher widmete sich dem Aufbau eines Hochvolt-Speichers für einen Porsche Boxter, wobei er sich auf die elektrische, mechanische und funktionale Sicherheit konzentrierte.**

Nach dem Bachelor arbeitete Tobias als FuSi-Manager und Elektroingenieur bei ACENTISS, während er parallel seinen Master in Elektrotechnik an der genannten Hochschule absolvierte. In seiner Masterarbeit bei EPCOS / TDK charakterisierte er einen MEMS-basierten CO_2-Sensor zur Messung von Feuchtigkeit, Temperatur und CO_2.

Mit drei Jahren Erfahrung bei ACENTISS prägte Tobias die Entwicklung eines autonom startenden, landenden und fliegenden Elektro-Seglers entscheidend mit. Gleichzeitig agierte er als Safety Manager und FuSa-Professional bei einem führenden Automobilhersteller in München.

Aktuell arbeitet er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Projekt dTec MORE, wo er maßgeblich am multilevelbasierten Antriebsstrang der Zukunft mitwirkt.

Modellbasierte Generierung von Embedded-Software

Christian Rothmund

I. Forschungsschwerpunkt

Durch Generierung von Software aus Referenzmodellen wird die Fehlerwahrscheinlichkeit reduziert und Entwicklungszyklen werden verkürzt. Prinzipbedingt wird der erzeugte Code modular und dadurch besser wartbar und dokumentierbar. Ziel meiner Forschungsarbeit ist es, die Generierung von Software, die in anderen Bereichen bereits üblich ist, für Automotive Embedded Software zu ermöglichen**.**

In der Softwareentwicklung kommen verschiedene Abläufe zum Einsatz, die in Modellen beschrieben werden. Für Embedded Software im Automobilbereich hat sich das sogenannte V-Modell etabliert. Es beschreibt die Phasen, die während der Entwicklung durchlaufen werden (linker Arm) sowie die zugehörigen Test- Verifikations- und Validierungsschritte (rechter Arm).

II. Ergebnisse 2025

Im Jahr 2025 wurde die notwendige Toolchain sowie die Rahmenbedingungen zum Einsatz dieser zusammengestellt und in Betrieb genommen. Weiterhin lag der Schwerpunkt auf dem Design, Beschaffung und Inbetriebnahme der Hardware-Plattform, einem modularen multilevelbasierten Forschungsspeicher zur Integration in ein Fahrzeug.

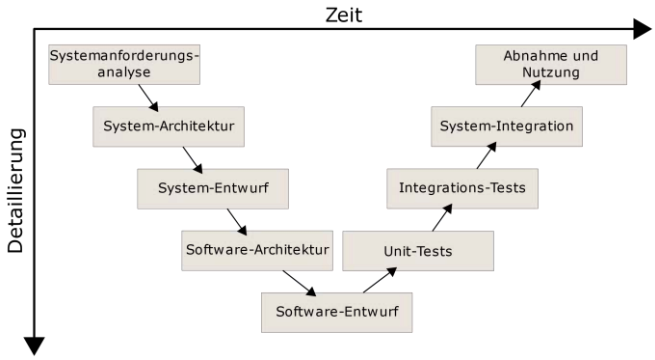


Abbildung 1: Das V-Modell; Eigene Abbildung.

III. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Es wird die Toolchain für die Generierung der Embedded Software auf Basis der Simulationsplattform Matlab Simulink der Mathworks Inc auf vorbereitend erstellte Modelle angewandt und validiert. Ziel ist eine lauffähige Umgebung, die stabile, nachvollziehbare und modulare Embedded-Software generiert. Dabei werden die Entwicklungszyklen getrackt und mit dem konventionellen Entwicklungszyklus verglichen, um den Erfolg und den Wirkungsgrad ermitteln zu können. Die Modelle werden vorab mit Messungen der realisierten Hardware verglichen und auf reales Verhalten hin optimiert.

Hierfür werden derzeit umfangreiche Messungen an der realen Hardware durchgeführt. Erster wichtiger Parameter sind hierbei die Halbleiterschalter (MOSFET) und deren Ansteuerungs- und Schaltverhalten.
In einem modularen Multilevel-Batteriespeicher ist das Schaltverhalten der eingesetzten MOSFETs von zentraler Bedeutung für Effizienz, Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Gesamtsystems. Anders als in einfachen Einzelwandlern arbeiten hier viele Leistungshalbleiter gleichzeitig in Serie und parallel, um hohe Spannungen und Leistungen aus vielen identischen Modulen aufzubauen. Genau diese Modularität macht eine sorgfältige Charakterisierung der MOSFETs erforderlich, weshalb die Vermessung mittels Doppelpulstest ein unverzichtbares Entwicklungs- und Validierungswerkzeug darstellt.

Der Doppelpulstest bildet reale Betriebsbedingungen nach, indem zunächst mit einem ersten Puls ein definierter Laststrom aufgebaut wird und anschließend mit einem zweiten Puls gezielt der Ein- oder Ausschaltvorgang des MOSFETs untersucht wird. Dadurch lassen sich Spannung, Strom und Gate-Signal während des Schaltvorgangs unter realistischem Strom- und Spannungsniveau messen. Für Multilevel-Batteriespeicher ist dies besonders wichtig, da hier nicht nur das Verhalten eines einzelnen MOSFETs relevant ist, sondern das zeitliche Zusammenspiel vieler Halbleiter, die möglichst gleichzeitig und kongruent schalten müssen.

Gleichzeitiges, kongruentes Schalten ist eine Grundvoraussetzung für eine gleichmäßige Spannungs- und Stromaufteilung zwischen den Modulen. Schon geringe Abweichungen in den Einschalt- oder Ausschaltzeiten einzelner MOSFETs führen dazu, dass ein Bauteil kurzzeitig eine höhere Spannung oder einen größeren Strom tragen muss als vorgesehen. In seriellen Multilevel-Strukturen kann dies zu gefährlichen Überspannungen an einzelnen Halbleitern führen, während in parallelen Pfaden Stromverdrängung und ungleichmäßige Verlustverteilung auftreten. Der Doppelpulstest macht diese Unterschiede sichtbar, da sich reale Schaltverzögerungen, das Miller-Plateau, dv/dt- und di/dt-Verläufe sowie Überschwinger direkt messen und vergleichen lassen. Nur so kann überprüft werden, ob alle MOSFETs unter identischen Ansteuerbedingungen tatsächlich zeitlich deckungsgleich schalten.

Eng damit verknüpft ist die Auslegung der Gate-Vorwiderstände. Die Gate-Widerstände bestimmen maßgeblich, wie schnell das Gate geladen und entladen wird und damit, wie steil die Schaltflanken ausfallen. In einem modularen Multilevel-Batteriespeicher beeinflussen sie nicht nur die Schaltverluste, sondern auch das EMV-Verhalten, die Höhe von Spannungsüberschwingern und die Anfälligkeit für

parasitäres Einschalten durch Miller-Kapazitäten. Datenblattangaben der MOSFET-Hersteller reichen hierfür nicht aus, da sie auf idealisierten Testaufbauten basieren und weder das reale Leiterplattenlayout noch die parasitären Induktivitäten, Isolationsbarrieren und Treiberpfade der Module berücksichtigen.

Der Doppelpulstest erlaubt es, die Gate-Vorwiderstände unter realen Bedingungen gezielt zu variieren und deren Einfluss direkt zu beobachten. Durch die Messung von Schaltverlusten, dv/dt-Überschwingern, Gate-Ringing und Schaltverzögerungen lässt sich ein Widerstandswert ermitteln, der ein möglichst identisches Schaltverhalten aller Module sicherstellt. In der Praxis zeigt sich dabei oft, dass unterschiedliche Module oder Treiberpfade leicht angepasste Gate-Widerstände benötigen, um trotz unvermeidbarer Streuungen ein kongruentes Schalten zu erreichen. Der Doppelpulstest liefert hierfür die notwendige messtechnische Grundlage.

Darüber hinaus dient der Doppelpulstest auch der Bewertung der Robustheit des Gesamtsystems. In Multilevel-Topologien treten hohe dv/dt-Belastungen und komplexe Rückwirkungen zwischen den Modulen auf. Der Test macht sichtbar, ob es zu unerwünschtem Miller-induziertem Turn-On, zu kritischen Spannungsüberhöhungen oder zu starkem Stress der Body-Diode beim Umschalten kommt. Diese Effekte sind entscheidend für die Langzeitzuverlässigkeit der MOSFETs und damit für die Lebensdauer des Batteriespeichers.

B. Steuerungssoftware für eine modulare Multilevel-Batterie aus Modell generieren

Auf Basis der Simulink-Modelle verschiedener Multilevel-Konzepte wird Embedded-Software mit der im vorherigen Schritt validierten Toolchain generiert. Die generierte Software wird im System zur Anwendung gebracht und im Gesamtsystem getestet.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

[1] MathWorks, "Legacy Code Integration," MathWorks. [Online]. Available: https://de.mathworks.com/help/simulink/legacy-code-integration.html. [Accessed: Nov. 28, 2025].

[2] MathWorks, "Legacy Code Tool," MathWorks. [Online]. Available: https://de.mathworks.com/help/simulink/slref/legacy_code.html. [Accessed: Nov. 28, 2025].

[3] MathWorks, "Averaging Filter," MathWorks. [Online]. Available: https://de.mathworks.com/help/coder/gs/averaging-filter.html. [Accessed: Nov. 28, 2025].

[4] MathWorks, "Unit Test External C Code with MATLAB Coder," MathWorks. [Online]. Available: https://de.mathworks.com/help/coder/ug/unit-test-external-c-code-with-matlab-coder.html. [Accessed: Nov. 28, 2025].

[5] MathWorks, "Integrate C Code with Simulink," MathWorks. [Online]. Available: https://de.mathworks.com/help/simulink/integrate-c-code-simulink.html?s_tid=CRUX_lftnav. [Accessed: Nov. 28, 2025.

[6] MathWorks, "Simulink Code Importer," MathWorks. [Online]. Available: https://de.mathworks.com/help/simulink/code-importer.html. [Accessed: Nov. 28, 2025].

[7] S. Kishore Roy and K. Basu, "Measurement of Circuit Parasitics of SiC MOSFET in a Half-Bridge Configuration," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 10, pp. 11911–11926, Oct. 2022, doi:10.1109/TPEL.2022.3176114. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3176114. [Accessed: Jan. 16, 2026].

[8] Z. Gao, H. Li, R. Chen and F. Wang, "Improved Double Pulse Test for Accurate Dynamic Characterization of Medium Voltage SiC Devices," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.xxxxxx (preprint). [Accessed: Jan. 16, 2026].

[9] "Double Pulse Test of the Paralleled Power MOSFETs in High Current 48V Inverter Design," *Proc. IEEE Conference*, 2025. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9962911. [Accessed: Jan. 16, 2026].

Kurzbiographie Autor — Christian Rothmund begann seine berufliche Karriere 2015 mit einem kooperativen Studium der Elektro- und Informationstechnik an der Technischen Hochschule Ulm, das er 2019 mit den Abschlüssen Elektroniker für Betriebstechnik und B.Eng. Elektrotechnik abschloss. Nach einem Jahr Berufstätigkeit entschloss er sich, ein berufsbegleitendes Masterstudium Systems Engineering and Management – Electrical Engineering zu beginnen. Den Abschluss M. Eng. erhielt er 2022.

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

ENERGIE & ANTRIEB

Prof. Dr.-Ing. habil. Lars Zigan

Diagnostik für Wasserstoffgemischbildung unter motorischen Bedingungen

Anton Schaumäker

I. Forschungsschwerpunkt

Im Rahmen des dtec.bw MORE II Teilprojekts 2.25 geht es um die Untersuchung der Wasserstoffgemischbildung mittels optischer Messtechnik. Zur Reduktion der Emissionen im Bereich der Mobilität bietet der Verbrennungsmotor weiterhin Potenzial, wenn er klimaneutral betrieben wird. Wasserstoff ermöglicht eine CO_2-freie Verbrennung und trägt somit erheblich zur Klimaneutralität bei. Gleichzeitig kann die Effizienzsteigerung der Verbrennungsprozesse die Energieträgernutzung weiter optimieren. So bleibt der Verbrennungsmotor eine erprobte Technologie, die mit nachhaltigen Lösungen zur klimafreundlichen Mobilität der Zukunft beiträgt. Wasserstoff unterscheidet sich grundlegend von Flüssigkraftstoffen, insbesondere in der Art der Gemischbildung. Die Untersuchung der Prozesse, die während der Gemischbildung auftreten, ist daher von zentraler Bedeutung. Eine optimierte Gemischbildung führt sowohl zu einer gesteigerten Effizienz als auch zu geringeren Stickoxidemissionen (NO_x).

Am Institut für Thermodynamik (LRT 10), Professur für Energiewandlung, der Universität der Bundeswehr München beschäftigen wir uns mit optischen Messverfahren zur Untersuchung thermodynamisch relevanter Prozesse in vielfältigen technischen Anwendungen wie zum Beispiel der motorischen Gemischbildung. Dafür stehen uns in den Laboren des Instituts verschiedene Versuchsstände und Messgeräte zur Verfügung.

II. Vorgehensweise

Für die Grundlagenuntersuchung zur Wasserstoff-gemischbildung im Rahmen des dtec.bw MORE II Projekts wurde am Institut ein existierender Versuchstand zur Simulation von motorischen Bedingungen erweitert für die Erprobung von Wasserstoffdiagnostik. Dabei handelt es sich um die optisch zugängliche Hochtemperatur Kalibrierzelle (HTCC), in der die Messungen durchgeführt werden. Diese kontinuierlich durchströmte Zelle kann auf Temperatur bis 900 K beheizt werden und es ist ein Druck bis 4 MPa einstellbar. Dies entspricht typischen motorischen Randbedingungen während der Einspritzung und Verbrennung. Als inertes Gas für den Hauptgasstrom wird Stickstoff verwendet, um die Zündung zu vermeiden. Die Zelle kann mit der hauseigenen Stickstofferzeugungsanlage verbunden werden und der Druckbereich wurde mittels der Beschaffung eines neuen Sensors auf 4 MPa erweitert.

Zur Diagnostik stehen vier optische Zugänge aus Quartz- bzw. Saphirglas zur Verfügung. Als Messtechnik für das Projekt sollen Schlierenaufnahmen verwendet werden. Der Aufbau dafür wurde konzipiert und ein Teil der nötigen optischen Komponenten beschafft. Als Alternative Messmethode stehen die Laser-induzierte Fluoreszenz und bildgebende Infrarotmesstechnik zur Verfügung. Anwendungen dieser diagnostischen Methoden für die Untersuchung von Wasserstoffjets und deren Gemischbildung lassen sich vereinzelt in der Literatur finden [1] [2].

Zur Eindüsung in die Zelle wurde ein Injektorflansch designt, der die Verwendung von industriellen Injektoren ermöglicht. Als Injektor wurde ein 5-Loch-Injektor der Firma BOSCH ausgewählt, der für hohe Brennstoffdrücke (z. B. 15 MPa) und Umgebungsdrücke bis 4 MPa geeignet ist.

Es ist geplant Helium als Ersatzgas für Wasserstoff zu verwenden. Die Eigenschaften des Edelgases gleichen denen von Wasserstoff größtenteils, jedoch ermöglicht Helium eine sicherere Versuchsdurchführung, da es inert und nicht brennbar ist. Die Validität von der Verwendung von Helium als Ersatzgas wird beispielsweise von Kim et al. [3] bestätigt.

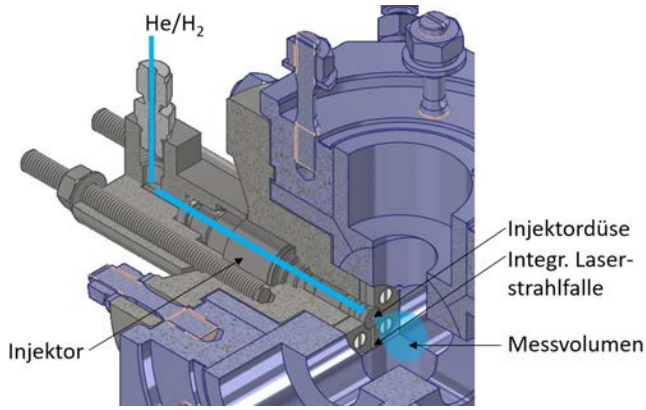


Abbildung 1: Injektorerweiterung der Hochtemperatur Kalibrierzelle (HTCC) zur Einspritzung von Helium oder Wasserstoff

III. Ergebnisse 2025

Im Jahr 2025 konnten im MORE II Teilprojekt 2.25 die relevanten Punkte der Zwischenziele erreicht werden. Nach dem Aufbau der Hochtemperatur Kalibrierzelle konnte diese, zunächst ohne die Injektorerweiterung, für sehr hohe Drücke bis 4 MPa in Betrieb genommen wurden. Es wurden neben Drucktests erste Versuche durchgeführt, um das Handling des Verstandsstands für den anvisierten Druck- und Temperaturbereich zu etablieren. Vor den für 2026 geplanten Messungen für die Wasserstoffgemischbildung konnten bereits erste Kraftstoffuntersuchungen mit Alkanen in der Kammer getestet werden, bei denen auch optische Diagnostik eingesetzt wurde.

Die Konzeption des optischen Aufbaus des Messverfahrens und die Auslegung und das Design der Injektorerweiterung wurden abgeschlossen. Abbildung 1 zeigt den neu entwickelten Flansch mit Injektor für die

Wasserstoffeindüsung und Abbildung 2 die Messzelle mit Schlierenaufbau. Für den Schlierenaufbau wurde für erste Testmessungen eine Hochgeschwindigkeitskamera und eine existierende LED verwendet, die zukünftig durch eine lichtstärkere Lichtquelle ersetzt werden soll.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Für das Jahr 2026 ist der Abschluss der Integration der Injektorerweiterung in die Hochtemperatur Kalibrierzelle geplant. Es steht teilweise noch die Fertigung von mechanischen Komponenten an. Des Weiteren werden für das konzeptionierte optische Messverfahren noch weitere Teile beschafft unter anderem eine besser geeignete Lichtquelle für das Schlierenverfahren. Nach dem finalen Ein- und Aufbau werden die geplanten Messungen mit dem Injektor durchgeführt. Dabei sollen die relevanten Messparameter variiert werden, um vertiefte Erkenntnisse über die Gemischbildung zu erlangen.

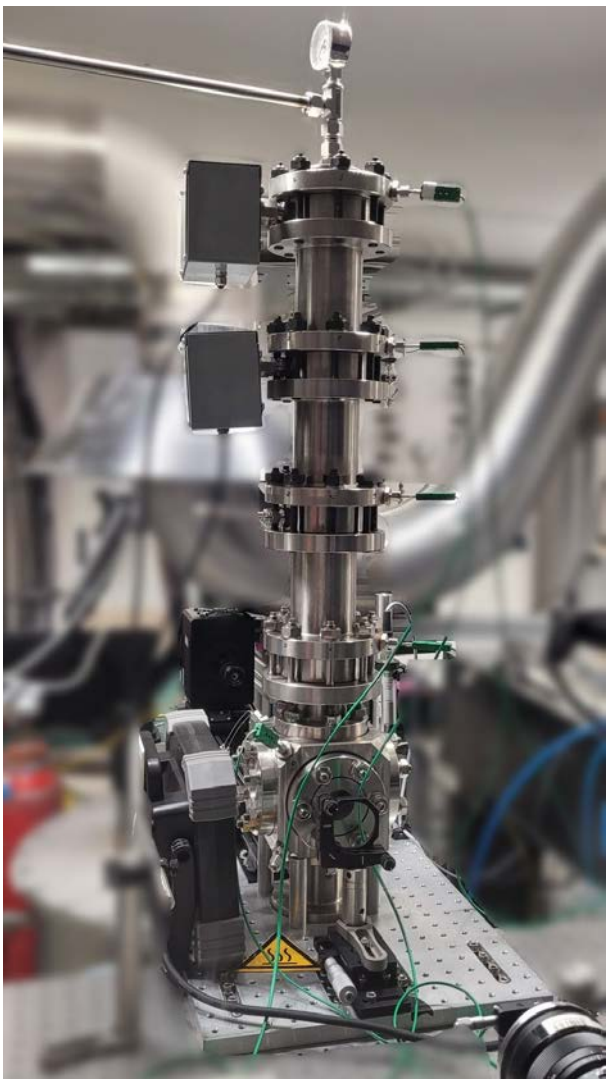


Abbildung 2: Hochtemperatur Kalibrierzelle (HTCC) mit optischen Schlierenaufbau

Literaturverzeichnis

[1] V. M. Salazar und S. A. Kaiser, „An Optical Study of Mixture Preparation in a Hydrogen-fueled Engine with Direct Injection Using Different Nozzle Designs," Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 2009.

[2] P. Leick, P. Jochmann, J. Geiler und M. Potenza, „Analysis of Fuel Injection and Mixture Formation in Hydrogen Engines," in *12th Meeting Injection and Fuels*, Dessau, Germany, 2023.

[3] J. J. Kim, S.-Y. Lee, Y. Ki, J. Hwang und C. Bae, „Feasibility of helium and nitrogen as surrogate gases for hydrogen jet using planar laser-induced fluorescence in a constant volume chamber," *International Journal of Hydrogen Energy,* Bd. 172, p. 151218, 2025.

***Kurzbiographie Autor* —Anton Schaumäker studierte an der Universität Stuttgart Luft- und Raumfahrttechnik und erwarb dort seinen Bachelor- und Masterabschluss. Seit 2023 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermodynamik (LRT 10), Professur für Energiewandlung, der Universität der Bundeswehr München tätig. Seine Forschung umfasst die Untersuchung transkritischer Sprayprozesse sowie die Gemischbildungsanalyse mittels optischer Messverfahren.**

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

VERNETZUNG & AUTONOMIE

Dr.-Ing. Thorsten Lüttel

Creating Pseudo-Labels for Training Perception Models for Dual-Use Autonomous Driving

Anton Backhaus

I. Research Focus

The research focuses on pseudo-labelling methods for dual-use vehicles operating in both off-road and urban environments, with particular emphasis on modelling the static and dynamic surroundings. A central challenge in this context is that modern AI models require large amounts of labelled training data to achieve robust performance, while manual annotation is costly and time-consuming. Pseudo-labels provide an effective means to accelerate the acquisition of approximate ground-truth data by automatically generating labels using existing models or sensor fusion pipelines. These automatically generated labels can then be used to train or refine models at scale, significantly reducing the reliance on manual labelling while enabling continuous improvement of perception systems.

II. Methodology

The proposed approach addresses the data scarcity problem by leveraging powerful offline perception models to generate pseudo-labels, which are subsequently used to train the target model. The environment is conceptually divided into two components: the dynamic world and the static world, which are processed separately.

The static world is represented through a set of ground-related semantic classes that capture both urban and off-road driving conditions. These include drivable surfaces such as asphalt and dirt roads, sidewalks, grass, road markings, and a generic obstacle class.
The obstacle class is generated using a separate pipeline: LiDAR points above the estimated ground surface are accumulated over time and filtered using a 2D Bayesian filtering approach to obtain a stable obstacle representation [1] (see Figure 1). This process explicitly excludes points associated with dynamic objects based on the dynamic bounding boxes.

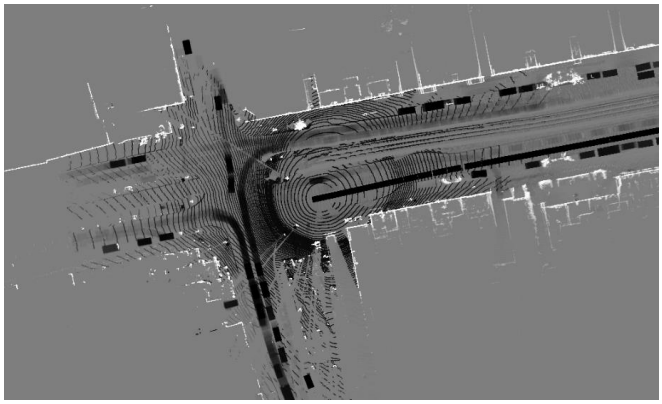


Figure 1: Probabilistic obstacle map of a busy intersection: Lighter tiles have a higher obstacle probability. Grey is unknown. Measurably even ground and tiles with dynamic objects (including ego vehicle) are less likely to have obstacles (darker).

The static semantic environment is obtained by combining semantic image predictions with LiDAR data. Semantic labels from camera-based segmentation are projected onto LiDAR points, yielding a consistent semantic representation of the ground plane (see Figure 2). Currently, we are using Mask2Former [2] for semantic segmentation.

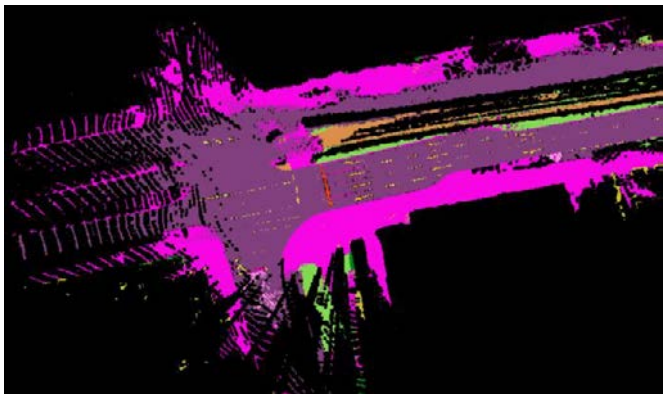


Figure 2: Semantic BEV map of a busy intersection: Purple and pink tiles are asphalt and sidewalk, respectively. It also differentiates between different road marking classes.

Dynamic objects (see Figure 3) are represented by 3D bounding boxes for cars, pedestrians, and cyclists, which are generated using MS3D [3]. MS3D is an offline framework that combines the predictions of multiple 3D object detection models to produce more robust and reliable results. By using models with different architectures and training data, the ensemble is better able to generalize to new and previously unseen environments. Detection quality is further improved

by aggregating information over multiple frames and applying temporal smoothing.

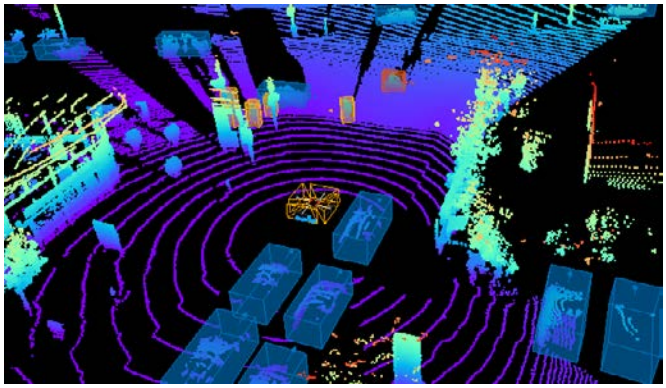


Figure 3: Pseudo-labelled scene with predicted bounding boxes of cars, pedestrians, and a cyclist.

Using this methodology, approximately 177,000 frames have been collected and pseudo-labelled at a rate of 2 Hz, corresponding to roughly 24 hours of driving data.

III. Results 2025

We have conducted some preliminary trainings on the model BEVFusion [4] using our pseudo-labelled dataset. First results look promising. The model has learned to predict bounding boxes and rough obstacle edges as can be seen in Figure 4. The training of the semantic BEV has yet to be implemented.



Figure 4: Prediction of pseudo-label-trained BEVFusion model. It uses all four cameras (outside) and a LiDAR (centre left) as sensor input and predicts obstacle tiiles (centre right). The model has not yet been trained on semantic BEV maps.

IV. Future work and next steps for 2026

For 2026 the focus lies on refining the pseudo-labels for 3D objects by:

- integrating more dynamic object classes
- using more accurate models for producing bounding box predictions
- including a small set of manually labelled data in the training to improve predictions

Refining the semantic BEV will involve:

- improving the predictions of the 2D semantic segmentation model
- using semantic information from satellite imagery

Finally, we aim to train, deploy and test this model as well as a camera-only or camera-radar version on different vehicles in challenging real-world scenarios.

References

[1] J. K. H.-J. W. Bianca Forkel, „Probabilistic Terrain Estimation for Autonomous Off-Road Driving,“ in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* , Xi'an, China, 2021.

[2] I. M. A. G. S. A. K. R. G. Bowen Cheng, „Masked-attention Mask Transformer for Universal Image Segmentation,“ in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, New Orleans, USA, 2022.

[3] J. S. B. M. S. E. N. S. W. Darren Tsai, „MS3D++: Ensemble of Experts for Multi-Source Unsupervised Domain Adaptation in 3D Object Detection,“ in *Transactions on Intelligent Vehicles (IV)*, Jeju Island, Korea, 2024.

[4] H. T. A. A. X. Y. H. M. D. R. S. H. Zhijian Liu, „BEVFusion: Multi-Task Multi-Sensor Fusion with Unified Bird's-Eye View Representation,“ in *Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, New Orleans, USA, 2022.

***Short biography* — Anton Backhaus has been working at the Institute for Autonomous Driving since 2021 and has been building on an AI-based perceptual static environment model. His research interests include computer vision and knowledge distillation.**

Uni-, Cross-, and Multi-Modal Keypoint Matching for Bird's-Eye View Perception

Lukas Beer

I. Forschungsschwerpunkt

In autonomous driving, a unified and accurate perception of the surrounding environment is crucial for safe and efficient navigation. To achieve this, modern perception systems rely on multiple sensors, such as cameras and Light Detection and Ranging (LiDAR). These sensors provide complementary information, enabling robust scene understanding and object detection. In order to effectively fuse data from different modalities, a unified representation is required. The BEV representation has emerged as a popular choice for this purpose, as it provides a top-down view of the environment, facilitating tasks such as object detection, segmentation, or HD-Map segmentation [1]–[6].

Even though BEV plays a central role in modern perception systems, Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) algorithms still predominantly operate with individual sensors. Often, these algorithms either estimate individual movements and fuse them in a later stage or use individual constraints from different sensors in an optimization or filtering framework. This does not fully leverage the complementary information provided by multiple sensors. Additionally, the features stay within their respective sensor modalities, cross-modal matching is often not possible.

Furthermore, on robotic platforms, such as drones or autonomous vehicles, hardware resources are often constrained. Previous approaches to keypoint detection often require an additional task-specific network to detect camera keypoints or extract handcrafted features.

II. Vorgehensweise

To address these challenges, we propose **BEVMatch**, a novel uni-, cross-, and multi-modal keypoint detection and matching framework designed for autonomous driving applications. Instead of relying on separate feature extractors from different modalities, BEVMatch detects and describes keypoints in a shared latent space. Forcing the keypoints to be in a shared latent space enables robust matching across different sensor modalities, such as cameras and LiDAR. Further, it can be embedded in a multi-modal, multi-task network, sharing the backbone features and thus reducing the computational overhead. Using Self-Supervised Learning (SSL), BEVMatch learns to detect and describe keypoints using the odometry between two frames. Hence, it does not rely on labeled data, making it suitable for large-scale deployment in autonomous driving.

A. Network Architecture

The developed network architecture can be seen in Abb. 1.

One major advantage of the proposed network is, that rather than requiring manual keypoint annotations, we use relative pose information from the vehicle odometry or RTK-GNSS measurements. Even though this still requires additional sensors for supervision, it is also possible to use algorithms like Iterative Closest Point (ICP) [7] or more sophisticated variants. However, most of the current datasets provide ground-truth pose or odometry estimates. In order to train BEVMatch, we need two things: input data for the

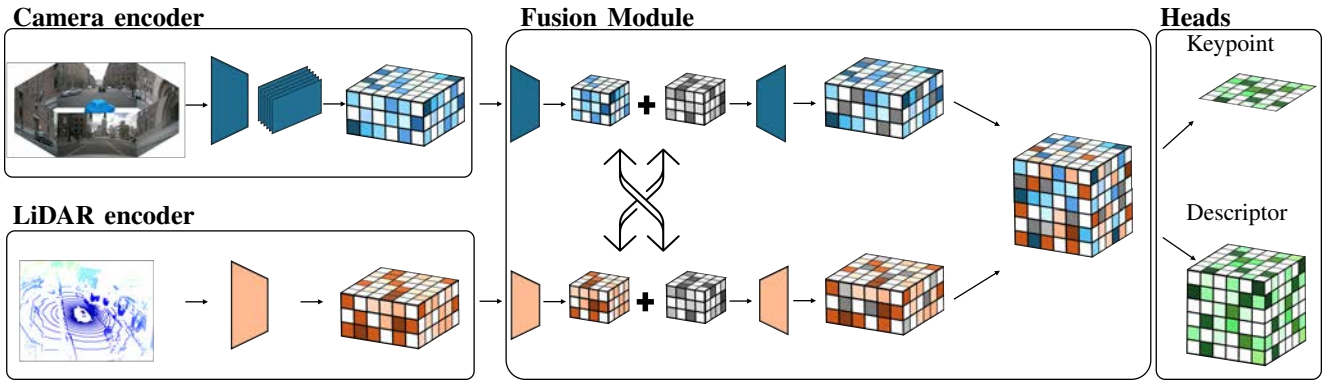


Abb. 1: Overview of the BEVMatch architecture. BEVMatch processes multi-modal sensor data through modality-specific encoders that produce separate Bird's-Eye View (BEV) representations (visualized with blue and orange). Using a cross-attention-based fusion module on downsampled BEV features, we obtain a unified feature space by adding the cross-attended features (grey) to the original features. After upsampling the enhanced features to the original resolution and fusion through a convolutional layer, we predict keypoint locations and descriptors in the shared BEV space.

BEV backbone and relative pose information between two frames. In our experiments, we tested the inputs to be either camera images, LiDAR point clouds, or both. However, the network should be able to further use different modalities, such as radar or thermal cameras.

III. Ergebnisse 2025

The results can be seen in Tabelle I. Our evaluation shows a strong performance in keypoint matching and subsequently localization, even across larger translations and rotations. Particularly, camera-LiDAR to camera-LiDAR and LiDAR to LiDAR matching outperformed the baselines across many metrics. Camera-to-camera and cross-modal matching were competitive, but did not present such a clear advantage to the baselines. Moreover, fusing camera with LiDAR features yielded modest accuracy gains but did not present a clear advantage towards LiDAR-only matching.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

While we successfully developed and trained a multi-modal neural network for keypoint detection and description, we mainly focused on public dataset and given data. However, in order to be useful in the context of MORE, the next steps involve gathering data for training, optimizing and deploying the network to a real vehicle, and evaluating its accuracy.

Literaturverzeichnis

[1] Z. Li, W. Wang, H. Li, E. Xie, C. Sima, T. Lu, Q. Yu, and J. Dai, "BEVFormer: Learning bird's-eye-view representation from lidar-camera via spatiotemporal transformers," *ECCV*, 2024.

[2] A. W. Harley, Z. Fang, J. Li, R. Ambrus, and K. Fragkiadaki, "Simple-BEV: What really matters for multi-sensor BEV perception?" in *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* IEEE, 2023, pp. 2759–2765.

[3] Z. Liu, H. Tang, A. Amini, X. Yang, H. Mao, D. Rus, and S. Han, "BEVFusion: Multi-task multi-sensor fusion with unified bird's-eye view representation," in *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* IEEE, 2023, pp. 2774–2781.

[4] J. Philion and S. Fidler, "Lift, splat, shoot: Encoding images from arbitrary camera rigs by implicitly unprojecting to 3d," in *ECCV*. Springer, 2020, pp. 194–210.

[5] B. Liao, S. Chen, X. Wang, T. Cheng, Q. Zhang, W. Liu, and C. Huang, "MapTR: Structured modeling and learning for online vectorized hd map construction," in *ICLR*, 2023.

[6] B. Liao, S. Chen, Y. Zhang, B. Jiang, Q. Zhang, W. Liu, C. Huang, and X. Wang, "MapTRv2: An end-to-end framework for online vectorized hd map construction," *IJCV*, vol. 133, no. 3, pp. 1352–1374, 2025.

[7] P. J. Besl and N. D. McKay, "Method for registration of 3-D shapes," in *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, vol. 1611. SPIE, 1992, pp. 586–606.

[8] H. Caesar, V. Bankiti, A. H. Lang, S. Vora, V. E. Liong, Q. Xu, A. Krishnan, Y. Pan, G. Baldan, and O. Beijbom, "nuScenes: A multimodal dataset for autonomous driving," in *CVPR*, 2020, pp. 11 621–11 631.

[9] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *IJCV*, vol. 60, no. 2, pp. 91–110, 2004.

[10] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, and G. Bradski, "ORB an efficient alternative to SIFT or SURF," in *ICCV*. Ieee, 2011, pp. 2564–2571.

[11] D. DeTone, T. Malisiewicz, and A. Rabinovich, "SuperPoint: Self-supervised interest point detection and description," in *CVPRW*, 2018, pp. 224–236.

[12] J. Sun, Z. Shen, Y. Wang, H. Bao, and X. Zhou, "LoFTR: Detector-free local feature matching with transformers," in *CVPR*, 2021.

[13] A. Segal, D. Haehnel, and S. Thrun, "Generalized-ICP," in *Robotics: Science and Systems*, vol. 2, no. 4, 2009, pp. 435–442.

[14] R. B. Rusu, N. Blodow, and M. Beetz, "Fast point feature histograms (FPFH) for 3d registration," in *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2009, pp. 3212–3217.

[15] F. Lu, G. Chen, Y. Liu, Z. Lijun, S. Qu, S. Liu, and R. Gu, "HRegNet: A hierarchical network for large-scale outdoor lidar point cloud registration," in *ICCV*, 2021.

***Kurzbiographie Autor*— Lukas Beer works since 2020 at the Institut for Autonomous Driving in the field of vehicle localization and perception. His work ranges from classical feature extractions for localization in semantic HD maps, to self-supervised keypoint extractions.**

TABELLE I: Keypoint matching results on nuScenes [8] for different sensor modalities and relative motion. We report mean translation error Δt (m), mean rotation error $\Delta\theta$ (°), and recall (%) at different thresholds. Best results are in **bold**. Further, we compare multiple modality combinations (Mod.).

Method	Mod.	Δt / $\Delta\theta$ (m / °)			Recall (%)								
		close	mid	far	0.5 m / 5°			2 m / 10°			5 m / 20°		
					close	mid	far	close	mid	far	close	mid	far
SIFT [9]	C2C	1.02/7.61	2.60/16.83	4.87/24.78	30.0	6.5	2.3	72.3	26.3	11.1	86.4	62.8	34.0
ORB [10]	C2C	0.54/3.99	2.03/12.13	4.63/20.60	59.3	21.4	6.2	83.3	43.2	19.0	95.5	72.9	41.3
SUPERPOINT [11]	C2C	0.23/2.46	1.13/6.92	3.35/12.21	77.7	45.0	18.7	89.3	67.4	39.9	98.3	81.8	59.0
LOFTR [12]	C2C	**0.15**/2.38	0.87/6.48	2.92/10.80	82.0	54.2	27.1	90.7	71.8	46.9	98.6	83.3	61.7
GICP [13]	L2L	0.28/**0.13**	3.52/1.68	10.07/6.56	91.8	35.6	7.8	93.0	37.9	8.3	99.8	47.3	10.8
RANSAC-FPFH [14]	L2L	0.26/0.29	0.67/**0.53**	4.06/3.23	**94.6**	**80.7**	**38.2**	98.0	90.8	50.7	**100.0**	91.4	51.6
HREGNET [15]	L2L	0.67/1.04	3.22/4.85	8.44/8.17	69.6	10.6	0.3	81.0	32.3	3.2	97.7	70.9	16.5
BEVMatch (Ours)	C2C	1.10/0.90	2.31/1.77	4.17/2.91	37.4	11.4	4.5	82.4	52.8	34.1	99.4	81.7	59.7
BEVMatch (Ours)	C2L	1.38/1.73	1.99/2.20	3.17/3.22	11.4	8.3	5.3	60.5	54.9	39.3	88.3	84.0	66.3
BEVMatch (Ours)	L2L	0.37/0.54	0.58/0.97	1.29/2.05	77.1	55.0	32.0	**99.9**	97.7	83.7	**100.0**	99.7	89.7
BEVMatch (Ours)	M2M	0.36/0.43	**0.57**/0.73	**1.19/1.39**	77.4	55.5	34.3	**99.9**	**98.4**	**85.6**	**100.0**	**99.8**	**90.4**

Untersuchung KI-basierter Ansätze zur Bewegungsplanung mit Schwerpunkt Behavior Cloning

Alexander Bienemann

I. Forschungsschwerpunkt

Autonomes Fahren wird viele Bereiche der zukünftigen Mobilität stark beeinflussen. Vollständig automatisierte Fahrzeuge können die Sicherheit im Straßenverkehr erhöhen, Umweltbelastung verringern, Lieferzeiten in der Logistik senken und bei militärischen Einsätzen leben retten. Die vollständige Realisierung des autonomen Fahrens setzt eine hochgradig integrierte und fehlerfreie Zusammenarbeit zahlreicher Teilsysteme voraus. Eine der zentralen Komponenten davon ist die Bewegungsplanung. Eine gute Bewegungsplanung ist dafür verantwortlich, dass ein Fahrzeug nicht nur reaktiv mit seiner Umgebung interagiert, sondern auch proaktive und intelligente Entscheidungen hinsichtlich der auszuführenden Bewegung trifft, die auf korrekt vorhergesagtem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer basieren. Die wissenschaftliche Untersuchung sowie die praxisorientierte Entwicklung von Algorithmen zur Bewegungsplanung bilden den Kern meiner Forschungsarbeit im Projekt MORE.

II. Vorgehensweise

Die Entwicklung von Algorithmen zur Bewegungsplanung ist noch immer ein wichtiger Forschungsschwerpunkt im Bereich des autonomen Fahrens [1], [2]. Im Rahmen des Projekts MORE wurde ein Model Predictive Control (MPC) Ansatz implementiert und auf einem autonomen Versuchsträger erfolgreich erprobt [3], [4]. Der Algorithmus erwies sich als sehr zuverlässig und robust, zeigte jedoch auch Schwächen. Die Berücksichtigung vieler Hindernisse zur selben Zeit ist als Echtzeitanwendung nicht umsetzbar. Auch müssen Randbedingungen (Fahrspuren, Hindernisse) möglichst immer als konvexes oder lineares Problem formuliert werden. Dies funktioniert gut für übersichtliche und geordnete Szenarien (Landstraße, Autobahn) ist aber für unstrukturiertes Gelände (Urban, Offroad) nur schwer umsetzbar. Besonders das Planen in Umgebungen mit vielen verteilten, statischen Hindernissen ist problematisch, da der MPC dazu neigt sich öfter mal in Sackgassen (fachlich auch als lokale Minima bekannt) zu verfangen. Zur Kompensation dieser Limitationen wurde ein hybrider Ansatz verfolgt, bei dem ein grafischer Suchalgorithmus (z.B. Hybrid A* [5]) die Trajektorienfindung unterstützt. Jedoch auch dieser kombinierte Ansatz stößt an Grenzen. Ein wesentliches Problem dieses hybriden Verfahrens ist, dass zwei komplexe System in Kombination viele Parameter hervorbringen, welche als Stellschrauben dienen, um das Systemverhalten zu justieren. Da diese jetzt miteinander verkettet sind und sich gegenseitig im Verhalten beeinflussen, ist ein Anpassen auf bestimmte Situationen zu aufwändig. Sätze von Parametern die für ein Szenario besonders gut geeignet sind, versagen wiederum in anderen.

Diese Herausforderung motivierte die Untersuchung von Künstliche Intelligenz (KI)-basierten Verfahren zur Bewegungsplanung. Zum Beginn von Projekt MORE waren diese damals noch keine Option, da solche Methoden große Mengen von Daten fürs Training der KI benötigen. Allerdings führten in den letzten Jahren Durchbrüche in der KI-Forschung und das Interesse der Industrie an dem Thema zur Veröffentlichung verschiedener Datensätze [6] und Tools zur Datengenerierung [7], was die akademische Forschung erheblich unterstützt. Eine ausgiebige Recherche nach den vielversprechendsten Ansätzen zeigte, dass die beiden Verfahren Behavioral Cloning (BC) [8] und Reinforcement Learning (RL) [9] am besten geeignet sein könnten. Entsprechend wurde innerhalb des Instituts die Implementierung beider Ansätze angestoßen, wobei BC von mir und RL von meinem Kollegen untersucht wurde. Erkenntnisse zum Thema RL werden deswegen in einem anderen Bericht thematisiert.

III. Ergebnisse 2025

Bevor konkrete Ergebnisse vorgestellt werden, wird zunächst erläutert, was genau BC ist. BC ist eine Form des überwachten maschinellen Lernens, bei der ein neuronales Netz direkt von Expertendemonstrationen lernt, indem es die Zuordnung von Sensordaten (Kamerabilder, LiDAR, Radar, Fahrzeugzustand etc.) zur entsprechenden Fahrzeugbewegung approximiert. Das Ziel ist es, das implizite Entscheidungsverhalten eines guten (oft menschlichen) Fahrers möglichst genau nachzuahmen, ohne explizit eine Kostenfunktion oder ein Umweltmodell zu formulieren. Die Methode ist besonders in der End-to-End-Bewegungsplanung beliebt und wurde erstmals von Waymo 2019 erfolgreich demonstriert. Damals wurden ca. 160.000 Kilometer aufgezeichneter Daten von menschlichen Fahrern für das KI-Training verwendet [8].

BC bietet im Vergleich zu klassischen Ansätzen wie MPC oder A* einige entscheidende Vorteile. Die Methode ist extrem schnell in der Inferenz (ca. $10\,\mathrm{ms}$), benötigt keine explizite Modellierung der Fahrdynamik, Umgebung oder Verkehrsregeln und kommt ohne aufwändige Kostenfunktions-Engineering und Constraint-Formulierung aus. Sie kann sehr natürliches, menschliches Fahrverhalten nachahmen, inklusive der kulturellen Verhaltensmuster (leicht aggressives Fahren um sich durchzusetzen, konservatives vorsichtiges Fahren), die klassische Planer nur äußerst schwer abbilden können. Zudem skaliert BC hervorragend mit Datenmenge

und ist vergleichsweise einfach zu trainieren und zu deployen, solange ausreichend gute Demonstrationsdaten vorhanden sind. Während also MPC und Graph-Search-Methoden oft mit expliziten Annahmen, vereinfachten Modellen und Rechenzeitproblemen kämpfen, liefert Behavior Cloning in der Praxis häufig ein wesentlich flüssigeres und angepassteres Verhalten, insbesondere in komplexen, unstrukturierten urbanen Szenarien. Die Trainingsdaten können dabei echte Fahrdaten aus realen Fahrzeugen sein oder synthetische Daten aus Simulationen.

Für die praktische Umsetzung wird BC als überwachtes Lernproblem formuliert. Aus einem gemessenem Zustand s_t (Eingangsvektor zur Zeit t) soll das Netz eine Aktion a_t (die Bewegung für die nächsten 2 s) vorhersagen, wobei die Zielwerte aus Expertendemonstrationen stammen. Im hier präsentierten System besteht s_t nicht aus Sensordaten (Kamera, LiDAR, Radar), sondern aus kompakten, planerrelevanten Größen, wie z.B. dem Fahrzeugzustand (Position relativ zur Referenzlinie, Gierwinkelfehler, Geschwindigkeit, Querbeschleunigung und Gierwinkelrate), einer lokalen Beschreibung der Referenzlinie (Krümmung, Sollgeschwindigkeit und relative Koordinaten entlang eines Vorhersagehorizonts) sowie einer Darstellung von Hindernissen im Fahrzeugkoordinatensystem (z.B. als Bounding-Boxen). Für einen ersten Versuch war das Ziel zu überprüfen, wie gut das trainierte Netz dazu in der Lage ist, einer Referenz zu folgen und dabei die Geschwindigkeit des Fahrzeugs an die Straßenkrümmung anzupassen und stehende Hindernisse zu berücksichtigen. Das Netz approximiert also eine Policy $\pi : s_t \rightarrow a_t$ und wird mit einer Regressionsverlustfunktion trainiert. Architektonisch genügt für diese Art strukturierter Eingaben häufig ein kompaktes Multi-Layer Perceptron oder ein kleines Hybridmodell. Das hier verwendete Netz hat vier Schichten mit 512 Neuronen pro Schicht und benutzt ReLU als Aktivierungsfunktion. Neben der Netzgröße sind in der Praxis auch Normalisierung der Eingänge, Datenabdeckung (Szenarienvielfalt, Randfälle) und Datenqualität entscheidend. Trainiert wird typischerweise mit dem Adam Optimierer, welcher für jeden Modellparameter eine adaptive Lernrate aus den gleitenden Mittelwerten von Gradienten und quadrierten Gradienten berechnet und dadurch schnelle sowie stabile Updates ermöglicht. Die Batchgröße ist die Anzahl an Trainingsbeispielen, die gleichzeitig verarbeitet werden, bevor das Netz einmal seine Gewichte aktualisiert. Diese wurde auf 256 gestellt für eine Lernrate von 10^{-4} (Schrittfaktor, mit dem der Optimierer die Modellgewichte pro Update verändert). Auf einer herkömmlichen Grafikkarte (z.B. RTX 3060/3070/3080) dauerte das Training für ein solches Netz ca. zwei Stunden, während die Inferenz im Bereich von 5 ms liegt, unabhängig der Anzahl an Hindernissen um das Fahrzeug. Die Ergebnisse des Trainings sind in Abbildung 1 zu sehen.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Für die nächsten Schritte ist angedacht, das Netz mit weiteren Daten zu erweitern (bewegliche Objekte, Hindernissgitter, etc.) um so mehr Funktionalitäten zu gewinnen. Das Netz soll außerdem mit einer KI zur Wahrnehmung verknüpft und dessen Praktikabilität am Versuchsfahrzeug getestet werden. Ein direkter Vergleich mit dem RL-Ansatz soll zeigen, welche Lücken noch geschlossen werden müssen.

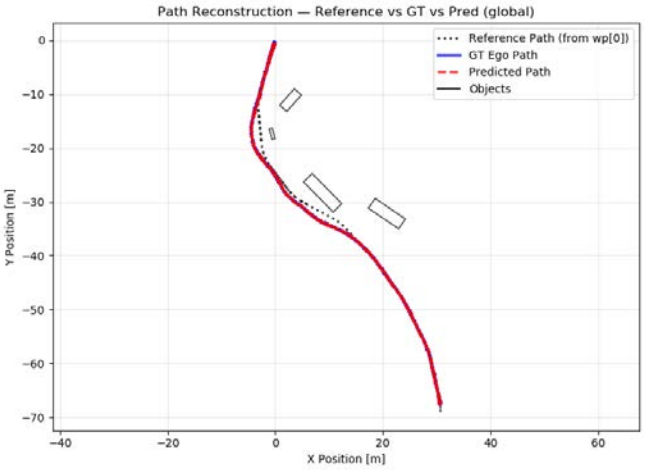


Abb. 1: Ergebnisse aus dem Training eines Netzes zur Bewegungsplanung. Das Netz schafft es die Bewegung des Fahrzeugs richtig vorherzusagen und somit Hindernisse zu umfahren.

Literaturverzeichnis

[1] L. Zhang, *et al.*, "Motion planning for robotics: A review for sampling-based planners," *Biomimetic Intelligence and Robotics*, vol. 5, no. 1, Mar. 2025.

[2] B. Liao, *et al.*, "DiffusionDrive: Truncated Diffusion Model for End-to-End Autonomous Driving," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Nashville, TN, USA, June 2025, pp. 12 037–12 047.

[3] A. Bienemann and H.-J. Wuensche, "Model Predictive Control for Autonomous Vehicle Following," in *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp. (IV)*, Anchorage, AK, USA, June 2023, pp. 1–6.

[4] L. Beer, *et al.*, "Vehicle Control in GNSS-Denied Environments Using Map-Based Localization and Model Predictive Control," in *Proceedings of 9th IEEE International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*, Osaka, Japan, May 2024, pp. 298–303.

[5] D. Dolgov, *et al.*, "Practical Search Techniques in Path Planning for Autonomous Driving," *AAAI Workshop - Technical Report*, Jan. 2008.

[6] K. Chen, *et al.*, "Womd-lidar: Raw sensor dataset benchmark for motion forecasting," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Syst. (IROS)*, Yokohama, Japan, May 2024, pp. 4766–4773.

[7] G. Mehr and A. Eskandarian, "SimBEV: A Synthetic Multi-Task Multi-Sensor Driving Data Generation Tool and Dataset," *arXiv*, vol. 2502.01894, Feb. 2025.

[8] M. Bansal, A. Krizhevsky, and A. Ogale, "ChauffeurNet: Learning to Drive by Imitating the Best and Synthesizing the Worst," in *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, Freiburg im Breisgau, Germany, June 2019.

[9] D. Zhang, *et al.*, "CarPlanner: Consistent Auto-regressive Trajectory Planning for Large-Scale Reinforcement Learning in Autonomous Driving," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Nashville, TN, USA, June 2025, pp. 17 239–17 248.

***Kurzbiographie Autor*— Alexander Bienemann erhielt seinen B.Eng. und M.Sc. in Mechatronik von der Technischen Hochschule Rosenheim in Deutschland. Derzeit promoviert er an der Universität der Bundeswehr München am Institut für Autonomes Fahren unter der Professur für Maschinelle Wahrnehmung. Seine Forschungsinteressen umfassen optimierungs- und lernbasierte Methoden zur Regelung und Trajektorienplanung.**

Probabilistische Kalibrierung der relativen Einbaulagen von Kameras, LiDAR- und Radarsensoren

Bianca Forkel

I. Forschungsschwerpunkt

Eine präzise Fusion von Sensordaten ist eine zentrale Voraussetzung für die zuverlässige Wahrnehmung der Umgebung autonomer Fahrzeuge. Insbesondere bei der Sensordatenfusion von Kamera-, LiDAR- und Radarsensorik ist eine exakte Kenntnis der relativen Einbaulagen der einzelnen Sensoren erforderlich, da jeder Sensor die Umgebung aus einer unterschiedlichen Perspektive und mit unterschiedlichen Messprinzipien erfasst. Bereits kleine Fehler in der extrinsischen Kalibrierung können zu systematischen Abweichungen in der fusionierten Umgebungsrepräsentation führen und sich negativ auf nachgelagerte Wahrnehmungs- und Planungsmodule auswirken.

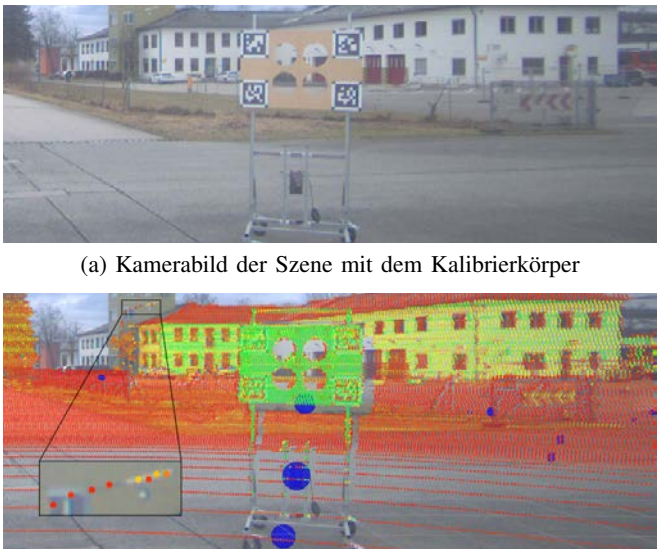
Der Forschungsschwerpunkt dieses Arbeitspakets liegt auf der Entwicklung eines hochgenauen, datengetriebenen Verfahrens zur gemeinsamen extrinsischen Kalibrierung von Kamera-, LiDAR- und Radarsensoren. Ziel ist es, die relativen 6D-Einbaulagen (Position und Orientierung) beliebiger Sensorkombinationen probabilistisch zu schätzen und dabei sensor- und dimensionsspezifische Messunsicherheiten explizit zu berücksichtigen. Im Fokus steht dabei insbesondere die robuste Einbindung moderner Radarsensoren, deren Messcharakteristik sich grundlegend von der optischer Sensoren unterscheidet und die mit klassischen Kalibrierkörpern nur eingeschränkt zuverlässig kalibriert werden können.

II. Vorgehensweise

Die entwickelte Kalibriermethode folgt einem optimierungsbasierten, datengetriebenen Ansatz und nutzt einen speziell konzipierten Kalibrierkörper, der von allen beteiligten Sensortypen zuverlässig detektiert werden kann. Der Kalibrierkörper kombiniert visuelle Marker für Kameras, geometrische Strukturen für LiDAR-Sensoren sowie einen Dopplersimulator als eindeutigen Referenzpunkt für Radarsensoren (vgl. Abb. 1).

Für die Kamerakalibrierung werden AprilTags [1] an definierten Positionen auf der Kalibriertafel eingesetzt, deren Ecken mit hoher Genauigkeit im Bild lokalisiert werden können. Die LiDAR-Sensoren detektieren, wie in [2] vorgeschlagen, die Kalibriertafel anhand kreisförmiger Aussparungen, deren Zentren auch bei niedrig aufgelöster oder geneigter Abtastung robust bestimmt werden. Zur Kalibrierung der Radarsensorik wird ein Dopplersimulator [3] verwendet, der ein eindeutig identifizierbares Radarziel mit bekannter Radialgeschwindigkeit erzeugt und so eine hochpräzise und eindeutige Radar-Detektion ermöglicht.

Die eigentliche Kalibrierung erfolgt durch eine gemeinsame nichtlineare Optimierung. Der zu schätzende Zustandsvektor umfasst sowohl die relativen Einbaulagen aller Sensoren zu einem frei wählbaren Referenzsensor als auch die Posen des Kalibrierkörpers zu verschiedenen Zeitpunkten. Für die unterschiedlichen Sensortypen werden Residuen in jeweils geeigneten Messräumen formuliert: Reprojektionsfehler im Bildraum für Kameras, kartesische 3D-Abstände für LiDAR-Messungen sowie Residuen im polaren Messraum (Entfernung, Azimut, Elevation) für Radarsensoren. Alle Residuen werden mit ihren jeweiligen Messunsicherheiten gewichtet, sodass eine physikalisch konsistente probabilistische Schätzung entsteht.



(a) Kamerabild der Szene mit dem Kalibrierkörper

(b) Projektion von LiDAR-Punkten (eingefärbt mit der Intensität) und Radar-Detektionen (blau) nach der Kalibrierung

Abb. 1: Beispielhaftes Kalibrierungsergebnis. Die Vergrößerung zeigt eine Straßenlaterne in $100\,\mathrm{m}$ Entfernung.

Durch die gemeinsame Optimierung können auch Sensoren kalibriert werden, die nicht zu jedem Zeitpunkt gleichzeitig den Kalibrierkörper beobachten. Es genügt, dass über die Messungen hinweg eine zusammenhängende Beobachtungskette zwischen den Sensoren entsteht.

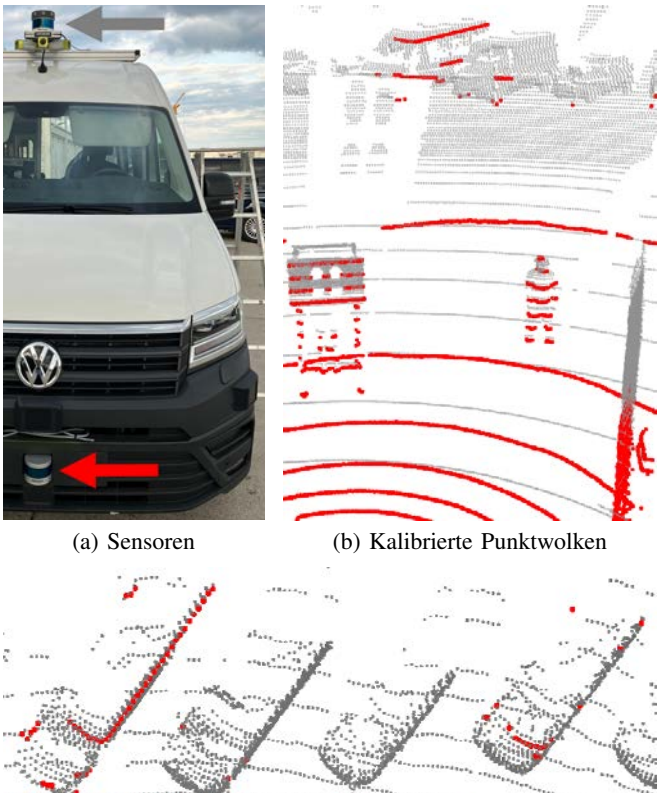
III. Ergebnisse 2025

Das entwickelte Kalibrierungsverfahren wurde umfassend mit realen Fahrzeugdaten evaluiert. Dabei wurden verschiedene Sensorkombinationen untersucht, darunter Radar-zu-LiDAR-, Kamera-zu-LiDAR- sowie LiDAR-zu-LiDAR-Kalibrierungen. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits eine geringe Anzahl unterschiedlicher Posen des Kalibrierkörpers ausreicht, um eine stabile und hochgenaue Kalibrierung zu erzielen.

TABELLE I: Kalibrierungsergebnisse (Calib., mit Nullintialisierung) im Vergleich zu den Ergebnissen eines 3D-Scans (Leo) und den Messungen mit einer Totalstation (Leica).

	Position in m			Orientation in °		
	x	y	z	Roll	Pitch	Yaw
Calib.	2,365	−0,706	−0,985	−178,6	−0,4	−46,4
Leo	2,405	−0,745	−1,379	−177,5	−1,4	−47,0
Leica	2,411	−0,749	−1,366	−178,6	−2,3	−46,5

Für die Radar-zu-LiDAR-Kalibrierung konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Orientierung des Radarsensors sehr präzise geschätzt wird und in der Genauigkeit mit aufwendigen externen Vermessungsverfahren mit einer Totalstation (*Leica*) oder einem 3D Scanner (*Leo*) vergleichbar ist (vgl. Tabelle I). Die Wiederholgenauigkeit der Kamera-zu-LiDAR-Kalibrierung liegt im Millimeter- bzw. Hundertstelgradbereich und erfüllt damit die Anforderungen an eine präzise Sensorfusion. Auch unter schwierigen Bedingungen, etwa bei geringer Überlappung der Sichtfelder oder bei niedrig aufgelösten LiDAR-Sensoren, liefert das Verfahren robuste und konsistente Ergebnisse (vgl. Abb. 2).



(a) Sensoren (b) Kalibrierte Punktwolken

(c) Orthogonale Draufsicht in 45 m Entfernung

Abb. 2: Beispielhaftes Kalibrierungsergebnis für einen *Velodyne VLS-128* und einen *Velodyne VLP-16* LiDAR-Sensor.

Das Kalibrierverfahren wurde als modular aufgebautes ROS-Framework mit grafischer Benutzeroberfläche implementiert, das auf der IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) 2025 präsentiert [4] und als Open-Source-Tool veröffentlicht wurde [1].

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Das entwickelte Kalibrierverfahren ermöglicht die hochgenaue Bestimmung der relativen Posen von Kameras, LiDAR- und Radarsensoren zueinander. Die räumliche Beziehung zwischen dem Sensorsystem und dem Fahrzeug bleibt jedoch unbekannt – ebenso wie die relative Lage des Sensorsystems zu der inertialen Navigationseinheit (INS). Die INS kalibriert zwar ihre GNSS-Antennen, die IMU sowie die eigenen Achsen selbstständig, und schätzt auch ihre Lage relativ zu den Fahrzeug-Achsen, liefert aber keine direkte Information über ihre Lage relativ zu anderen Sensoren.

Ein möglicher nächster Entwicklungsschritt besteht daher darin, den Kalibrierkörper zusätzlich mit mehreren GNSS-Empfängern (z. B. zwei bis drei Antennen) auszustatten. Dadurch kann die Pose des Kalibrierkörpers im globalen Koordinatensystem geschätzt und in Relation zur INS des Versuchsträgers gesetzt werden. In Kombination mit der bereits bekannten relativen Pose zwischen Kalibrierkörper und Sensorsystem lässt sich so erstmals auch die vollständige räumliche Transformation zwischen INS und allen weiteren Sensoren bestimmen. Dies würde eine automatische, präzise Kalbrierung von Kameras, LiDAR- und Radarsensoren zum fahrzeugfesten Navigationssystem und damit gleichzeitig auch zum Fahrzeug ermöglichen.

Ergänzend dazu könnte perspektivisch untersucht werden, inwieweit eine grobe Online-Nachkalibrierung auch ohne explizites Kalibrierziel möglich ist. Denkbar sind hierbei Konsistenzanalysen auf Basis von neuronalen Netzausgaben, etwa unter der Annahme, dass erkannte Fahrzeuge im Mittel entlang der Fahrtrichtung orientiert sind und entsprechend ausgerichtete 3D-Bounding-Boxen liefern sollten. Diese geometrischen Nebenbedingungen könnten beispielsweise leichte Gierwinkeländerungen nach einem Umbau der Sensorik auf ein anderes Fahrzeug erkennen und korrigieren.

Literaturverzeichnis

[1] E. Olson, "AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011.

[2] C. Guindel, J. Beltrán, D. Martín, and F. García, "Automatic Extrinsic Calibration for Lidar-Stereo Vehicle Sensor Setups," in *Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2017.

[3] Heicks Industrieelektronik GmbH, "Dopplersimulator MDS 77 for the adjustment of lane change assistance systems," in *Operating instructions V001799 -– Dopplersimulator MDS 77 — OEM 2*, 2024. [Online]. Available: https://www.heicks.de/wp-content/uploads/2024/09/BA-MDS-77-V001799.03_EN.pdf

[4] B. Forkel, P. Berthold, and M. Maehlisch, "An Extrinsic Sensor Calibration Framework for Precise Probabilistic Joint Calibration of Camera, LiDAR, and Radar," in *Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, Gold Coast, Australia, Nov. 2025.

***Kurzbiographie Autor*— Bianca Forkel arbeitet seit 2019 am Institut für Autonomes Fahren (ehemals Technik Autonomer Systeme) an der Wahrnehmung der statischen Umgebung autonomer Fahrzeuge. Nach Abschluss ihrer Promotion zur Fusion von Kamera und LiDAR für die kartenlose Wahrnehmung auf Feldwegen beschäftigt sie sich nun zusätzlich unter anderem auch mit der Kalibrierung von Radarsensoren.**

[1] https://github.com/UniBwTAS/sensor_calib_tas

A Dynamics-Decoupled Reinforcement Learning Approach for Zero-Shot Sim-to-Real Transfer

Thomas Steinecker

I. Forschungsschwerpunkt

The research focus lies on reinforcement learning (RL) for the local planner within an overall autonomous driving architecture. The local planner is solely responsible for handling its immediate surroundings and no global navigation, which is task of other parts of the system. This includes dealing with both static and dynamic elements of the environment.

This setup introduces several challenges, such as the sim-to-real gap in perception and control, simulation data generation, reward design, and exploration strategies. As an initial step, the sim-to-real gap was addressed to enable the deployment of RL-based control on a real vehicle without relying on perception inputs.

II. Vorgehensweise

The sim-to-real gap in vehicle control has been addressed in the literature using various approaches. These include learning an approximation model of the real vehicle that can be used in simulation [1], or progressively enhancing the simulation by incorporating increasingly detailed dynamic effects [2].

However, these methods still suffer from practical limitations. They must adapt to a wide range of changing dynamic conditions, such as variations in vehicle mass, tire properties, and road surface conditions. As a result, significant effort is required to maintain robustness across different scenarios.

In contrast, our approach is simpler and can be considered a zero-shot sim-to-real method. During simulation, only the kinematic constraints of the real vehicle are considered, rather than its full dynamics, using a bicycle model. The RL agent is trained to predict the next control action, namely acceleration and steering rate, while ensuring feasible outputs. In addition, a second agent is trained to generate a future trajectory instead of a single control action.

The core idea is to record both the simulated and real vehicle trajectories and to control the real vehicle using longitudinal and lateral controllers that minimize the deviation from the simulated trajectory. After training both the RL-based control agent and the trajectory-generating agent in simulation to follow a given track, the learned policies are directly applied to the real vehicle. An overview of this concept is shown in Figure 1.

We emphasize the main advantage of this approach: it can be applied in a zero-shot manner, meaning that no iterative RL training and deployment cycles are required on the real system. The overall accuracy is primarily determined by tuning the real-world controllers, which are not part of the simulation.

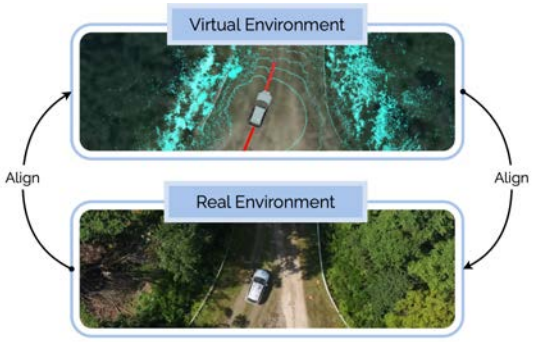


Abb. 1. Concept of virtual-to-real trajectory alignment. A kinematic vehicle model, initialized with the real state, generates a virtual trajectory. Alignment strategies ensure that the real vehicle remains longitudinally and laterally synchronized with this virtual reference.

III. Ergebnisse

The effectiveness of the proposed sim-to-real approach in handling dynamic discrepancies was evaluated using the real test vehicle MuCAR 3. The vehicle was driven along a track that had previously been recorded by a human driver, with velocities of up to 40 km/h.

The results of this evaluation are shown in Figure 2. The top plot depicts the longitudinal deviation between the real and simulated vehicle. The error remains below 18.5 cm for most of the trajectory, except during the start and stop phases, where deviations of up to 50 cm occur. These larger errors are caused by internal control characteristics, such as thresholds required to initiate vehicle motion.

The lateral deviation also remains below 10 cm for the majority of the drive, with increased errors at the beginning and end of the trajectory. Some oscillatory behavior is visible, indicating that more advanced control strategies such as [3] could further reduce lateral wiggling.

IV. Ausblick und nächste Schritte

Future work will extend the approach by incorporating a bird's-eye-view (BEV) perception module with a reduced set of semantic classes, including drivable, unpreferable drivable, and non-drivable areas.

Initially, the focus will be on static elements of the environment, such as parked vehicles, trees, and non-drivable terrain. Dynamic obstacles will be introduced using self-play strategies. Furthermore, each agent will be made parameterizable while sharing a common neural network architecture. All agents will be trained within the same environment using this shared network which is inspired by [4].

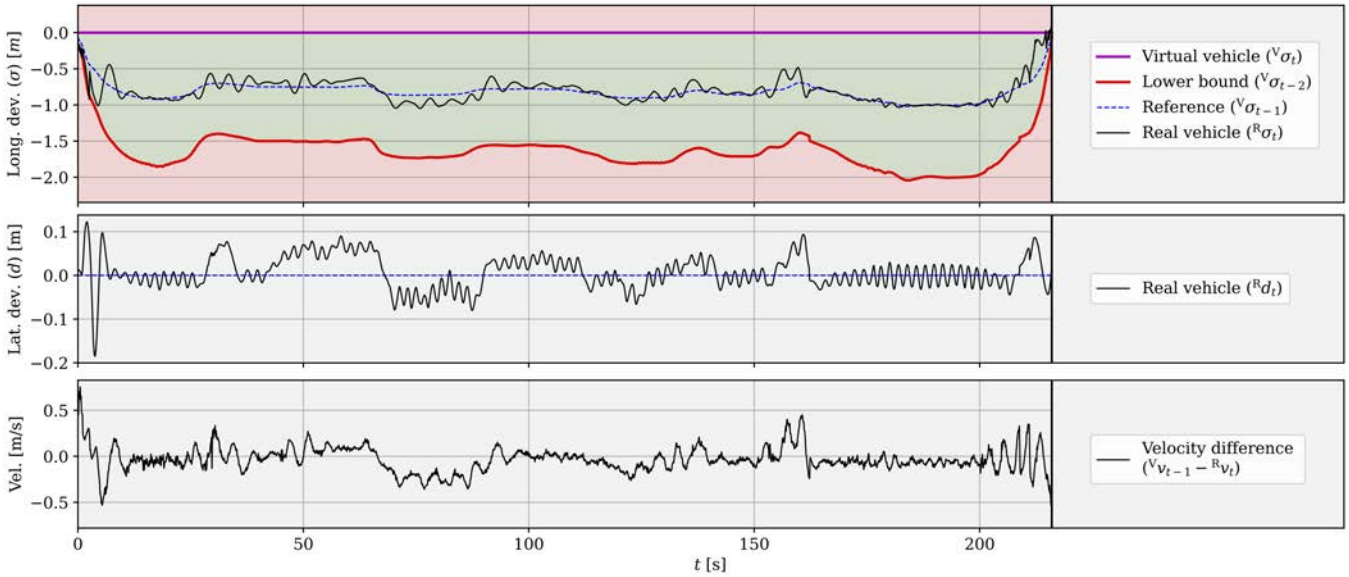


Abb. 2. Results from the real-vehicle experiment. **Top**: longitudinal alignment, with the green area indicating the admissible deviation of the real vehicle with respect to the virtual vehicle, and the blue dashed line denoting the desired reference. The longitudinal position of the real vehicle (${}^{\mathrm{R}}\sigma_t$), the lower bound (${}^{\mathrm{V}}\sigma_{t-2}$), and reference (${}^{\mathrm{V}}\sigma_{t-1}$) are shown relative to the virtual vehicle. **Center**: lateral deviation of the real vehicle with respect to the virtual trajectory. **Bottom**: velocity difference between the desired and the real vehicle's velocity.

***Kurzbiographie Autor*— Thomas Steinecker has been working at the Institute of Autonomous Driving since November 2021 and specializes in behavior planning for autonomous driving. His research interests include safety-oriented and sim-to-real reinforcement learning.**

LITERATURVERZEICHNIS

[1] P. Maramotti, A. P. Capasso, G. Bacchiani, and A. Broggi, "Tackling Real-World Autonomous Driving using Deep Reinforcement Learning," in *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2022, pp. 1274–1281.

[2] K. L. Voogd, J. P. Allamaa, J. Alonso-Mora, and T. D. Son, "Reinforcement Learning from Simulation to Real World Autonomous Driving using Digital Twin," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 1510–1515, 2023.

[3] A. Seiffer, M. Frey, and F. Gauterin, "Pragmatic and Effective Enhancements for Stanley Path-Tracking Controller by Considering System Delay," *Vehicles*, vol. 5, no. 2, pp. 615–636, 2023.

[4] M. Cusumano-Towner, D. Hafner, A. Hertzberg, B. Huval, A. Petrenko, E. Vinitsky, E. Wijmans, T. Killian, S. Bowers, O. Sener, *et al.*, "Robust autonomy emerges from self-play," *arXiv preprint arXiv:2502.03349*, 2025.

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

VERNETZUNG & AUTONOMIE

Prof. Dr. rer. nat. Matthias Gerdts

Safety-oriented Dynamic Path Planning for Automated Vehicles

Mostafa Emam and Matthias Gerdts

I. Introduction

This report extends previous research employing Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) to facilitate real-time path planning and obstacle avoidance for Autonomous Vehicles (AVs). Here, five controllers were developed and comparatively tested to evaluate their behavior with respect to static and dynamic obstacle avoidance. The controllers incorporate NMPC with homotopy-based constraints and fallback strategies to guarantee safe path generation and maneuvering, even under adverse conditions. As part of this research, the paper [1] was presented in **IEEE VTC2025-Spring**, where it received the *Best Conference Paper Award*.

II. Static Obstacle Avoidance [AP 3.12.1]

In this scenario, two stationary obstacles are positioned on either side of the reference travel path, which forces the AV to maneuver aggressively for successful road navigation. Here, we present aggregated figures for the five controllers and direct the reader to https://doi.org/10.5281/zenodo.14652538 for descriptive simulation videos.

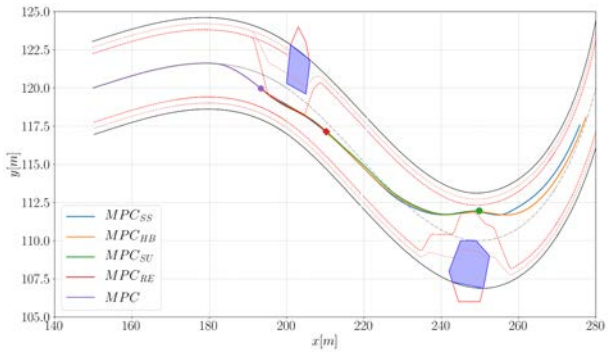


Fig. 1. Aggregated constraints and paths for the first test scenario

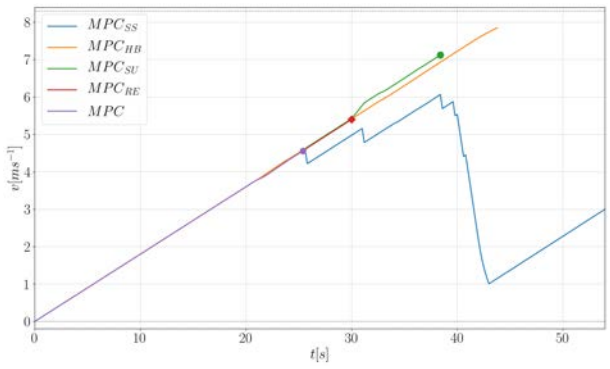


Fig. 2. Velocity profiles for the first test scenario

Figure (1) depicts the road edges with solid black lines, where the augmented lane boundaries are marked in red when the homotopy index $\zeta = 1$ and maroon at $\zeta = 0.5$. The obstacles are represented by red squares and their relevant in-lane protrusions are shaded in blue. The three controllers MPC, MPC_{RE}, and MPC_{SU} handle dynamic lane boundaries as hard constraints, which results in problem infeasibility when operating at the system limits. Consequently, these controllers were unsuccessful in completing the scenario, and the exact locations where they failed are indicated with circular markers.

On the one hand, MPC_{SS} navigated the scenario successfully by frequently engaging the stopping fallback strategy, as illustrated in Figure (2). The repeating AV deceleration simplified the problem, thereby allowing the controller to eventually recover after traversing the challenging road sections. On the other hand, the homotopy approach employed by MPC_{HB} iteratively engaged the dynamic lane boundaries, which always guaranteed solving a simpler problem before proceeding with a more restrictive one. This resulted in a smooth driving trajectory with minimal deceleration, which demonstrably outperformed other controllers.

III. Dynamic Obstacle Overtaking [AP 3.12.2]

This scenario commences with the AV at $v = 6.0[ms^{-1}]$, where it has the target of overtaking a moving vehicle with $v = 4.0[ms^{-}1]$. Owing to the spacious maneuvering area, all controllers successfully completed this test with almost indistinguishable travel paths as demonstrated in Figure (3). This is an expected outcome due to their shared algorithmic foundation (i.e., NMPC) with identical objective function weights. The intermediate solutions generated by MPC_{HB} are illustrated in Figures (4,5), where they showcase the successful integration of the obstacle's dynamic behavior in the solution computation, while ensuring compliance with the specified problem constraints.

TABLE I. Average controller solution time for both test scenarios

	Scenario 1		Scenario 2	
	Done?	$t_{mean}[ms]$	*Done?*	$t_{mean}[ms]$
MPC	×	14.311	✓	27.653
MPC_{RE}	×	19.781	✓	24.472
MPC_{HB}	✓	24.359	✓	35.771
MPC_{SU}	×	40.917	✓	25.025
MPC_{SS}	✓	44.671	✓	23.873
OCP_{stop}	–	20.096	–	23.141

Finally, Table (I) summarizes the achieved results and lists the average computational time for each controller.

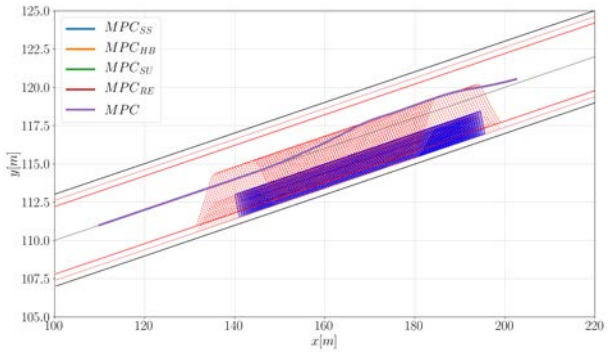


Fig. 3. Aggregated constraints and paths for the second test scenario

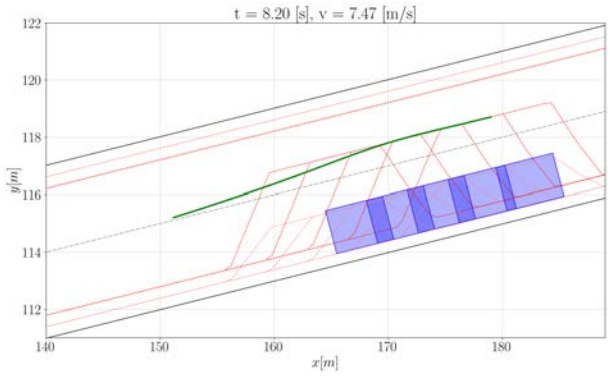


Fig. 4. Intermediate MPC_{HB} solution at $t = 8.2[s]$ and predicted constraints

IV. Conclusion

In this report, we present a comprehensive control framework for AVs navigating dynamic environments, with a focus on safety and real-time performance. The key innovation lies in augmenting NMPC with homotopy-based constraints to enhance the problem's tractability and offering an independent backup strategy for fallback trajectory planning. Numerical simulations prove the effectiveness of the proposed methods in challenging and dynamic driving scenarios, and future research will focus on real-world validation.

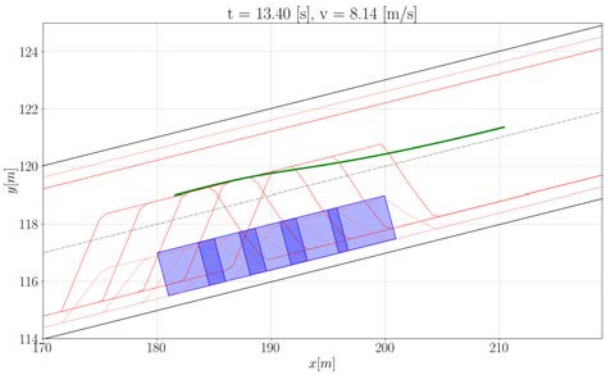


Fig. 5. Intermediate MPC_{HB} solution at $t = 13.4[s]$ and predicted constraints

References

[1] M. Emam and M. Gerdts, "Safety-oriented dynamic path planning for automated vehicles," in *2025 IEEE 101st Vehicular Technology Conference (VTC2025-Spring)*. Oslo, Norway: IEEE, June 2025, pp. 1–7.

***Kurzbiographie Autor*— Mostafa Emam has been working since July 2021 as a scientific researcher at the Department of Aerospace Engineering, under the supervision of Professor Matthias Gerdts. His research interests include Model Predictive Control, trajectory planning, real-time vehicle control applications, and Automated Driving systems.**

Entwicklung einer adaptiven Geschwindigkeitsregelung für die umgesetzten Bahnfolgeregler

Thomas Rottmann (Prof. Gerdts, LRT1)

I. Forschungsschwerpunkt

Im DTEC-Projekt MORE werden Shuttle für den automatisierten Verkehr auf dem Campus der UniBw München entwickelt und umgesetzt. In diesem Zusammenhang wurde die Automatisierung in einzelne Prozesse aufgeteilt. Hierbei wurden Arbeitspakete für die Umfeldwahrnehmung, die daraus resultierende Entscheidungsfindung als auch die Fahrplanung und Ausführung definiert. Der Schwerpunkt meiner Arbeit konzentriert sich auf die Bahnplanung, die Bahnfolgeregelung und die entsprechende Umsetzung auf den Fahrzeugen. In dem bisherigen Projektverlauf wurden hierzu mehrere Bahnfolgeregler und Bahnplaner entwickelt und umgesetzt als auch die nötigen Fahrzeugschnittstellen in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für autonomes Fahren, implementiert und an die jeweiligen Plattformen adaptiert.

Die Planer als auch die Folgeregler zeigten eine gute Performance für die Planung und die Folgeregelung, es wurden jedoch auch hohe Empfindlichkeit gegenüber unzureichenden Grundbahnen oder hochdynamischen Änderungen in der Umfeldwahrnehmung deutlich. Diese sollten im Jahr 2025 näher Untersucht und durch passende Strategien abgemildert oder ganz abgefangen werden.

II. Vorgehensweise

Die praktischen Erprobungen im Jahr 2024 als auch im ersten Quartal 2025 haben bei einigen Testfahrten folgende drei Aufgabenfelder erkennen lassen:

- Unzureichende globale Bahn
- Bahnplanung führt zu Unstetigkeiten bei der Bahnfolgeregelung
- Abweichungen durch technische oder externe Einflüsse

Durch die Aufzeichnung entsprechende Situation konnten die jeweiligen Ursachen näher analysiert werden. Hierbei erforderten die verschiedenen Ursachen auch unterschiedliche Herangehensweisen. Eine klar definiert und abgrenzbare Vorgehensweise konnte für den Fall von Regelabweichungen durch technische oder externe Einflüsse getroffen werden. Die entstandenen Regelabweichungen konnten durch Fahrbahngegebenheiten, wie Vereisung oder starker Regen, als auch durch Limits in der Fahrzeugansteuerung, in fast allen Fällen durch Lenkdefizite, erklärt werden. Die technischen und physikalischen Grenzen können durch die vorliegenden Gegebenheiten nicht verschoben werden. Somit müssen zum einen die Bahnplanung als auch Geschwindigkeitsplanung angepasst werden. Die Bahnplanung berücksichtigt die Abmaße und dynamischen Eigenschaften der Versuchsfahrzeug entsprechend dem Einspurmodel, ist hierbei aber nicht für große Abweichungen ausgelegt. Somit kann es bei starken Abweichungen von der globalen Bahn zu fehlgeschlagenen oder auch nicht fahrbaren Bahnen kommen. Der Regler ist in dieser Verarbeitungskette auch nicht in der Lage dieses Verhalten zu verbessern. Auch entsprechende Wettereinflüsse können zu entsprechenden Fehlplanungen führen. Da das Versuchsfahrzeug sich nicht mehr nach den ermittelten Parametern des Modells verhält. Bei Ursachen können mit entsprechend angepassten Fahrzeugmodellen mitberücksichtigt werden. Steigern somit aber erheblich den Rechenaufwand und beeinflussen somit die Echtzeitfähigkeit des Gesamtsystems. Für die verbleibende Projektzeit wurde der Fokus somit nicht auf eine vollständige Modellierung, sondern auf eine dynamische Anpassung der Reglereinflüsse gelegt, wie im nachfolgenden Abschnitt gezeigt wird.

Eine weitere Ursache für unzureichendes Fahrverhalten im Bahnfolgeregler, konnte durch die Qualität der globalen Bahn identifiziert werden. Somit zeigten sich in speziellen Straßenkonstellationen, unstetige Abweichungen von einer für den menschlichen Fahrer intuitiv gewählten Bahn. Diese sind als Fehlverhalten der vorgeschalteten Verarbeitungsebene zu sehen. Der Bahnfolgeregler soll auch in solchen Gegebenheiten ein gutmütiges Regelverhalten zeigen. Das Problem verstärkt sich bei Versuchsfahrzeugen mit langem Radstand nochmal mehr, da der lange Radstand als ein Art Totzeit interpretiert werden kann. Wie im Jahresbericht 2024 bereits gezeigt wurde, ist der gewählte virtuelle Regelpunkt hier ausschlaggebend. Wird dieser eher in Richtung der Fahrzeugfront verschoben, erreicht man eine schnelle Bahnfolgegüte, jedoch kann es in engen Stellen zu einem erheblichen Kurven schneiden kommen, was gerade bei engen einspurigen Fahrbahnen mit baulichen Begrenzungen als auch mehrspurigen Straßenszenarien mit Gegenverkehr zu erheblichen Problemen führen kann. Analog wirkt sich die Verschiebung in Richtung Fahrzeugheck als Verzögerung in der Regelgüte aus. Es entsteht eher der Eindruck eines Nachlaufens des Fahrzeugs. Der Regler kann eine fehlerbehaftete nicht von einer gewollten Bahn differenzieren. Für die Querregelung ergeben sich auch hier zwei mögliche Ansätze. Zum einen ein prädiktives Model für eine Bahnbewertung aufzubauen, um entsprechende ungewollte Fehlplanungen mit einer Parameteranpassung in der Regelung entgegen zu wirken oder die Reglereinflüsse entsprechend dynamisch zu verbessern. Wie es im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Neben den zwei zuvor genannten Gründen für Reglerabweichungen, konnten auch Neuplanungen der Bahnplaners als Ursache identifiziert werden. Es wurden in den letzten Jahren verschiedenste Bahnplaner implementiert und in der Praxis getestet. Die geplanten Bahnen zeigten hierbei durchgängig eine hohe Güte. Die einzelnen geplanten Bahnen konnten gut durch den Folgeregler ausgeregelt werden. Jedoch

zeigten sich beim Übergang zwischen zwei aufeinander geplanten Bahnen, teilweise Probleme durch unstetige Übergänge. Für den Bahnfolgeregler ist ein stetiger Übergang zwischen zwei geplanten Bahnen entscheidend. Durch sprunghafte Abweichungen in der Position des Versuchsfahrzeug oder auch sprunghafte Bahnänderungen der globalen Bahn. Als auch durch Bahnplanungen in Situation mit starken Regeländerungen, kann nicht immer sichergestellt sein das ein stetiger Übergang zwischen den Bahnen erfolgt. Daraus können sich sprunghafte Regelungen ergeben, welche als Fehlverhalten eingeschätzt werden. In allen bisher beschriebenen Fällen ist davon auszugehen, dass durch eine entsprechende Anpassung des zugrundeliegenden Models eine Verbesserung zu Lasten der Rechenzeit gewonnen werden kann. Wie bereits zuvor beschrieben sollen auch die Regeleinflüsse betrachtet werden.

III. Analyse und Umsetzung

Der Bahnfolgeregler wurde bereits konzeptionell als reine Querregelung ausgelegt. Die Längsreglung wurde bis dahin als einfacher Proportionalregler für das von der Planung vorgegebene Geschwindigkeitsprofil gewählt. Um ein sicheres als auch komfortables Fahrverhalten während der Fahrversuche zu erzielen, wurde die Längsregelung um Anteile für die Beschleunigung aus und in den Stand als auch einen Anteil für die krümmungsabhängige Anpassung der Geschwindigkeit in Kurven erweitert. Das durch die globale Planung vorgegebene Geschwindigkeitsprofil gibt hierbei immer die größtmögliche Geschwindigkeit vor, welche gefahren werden soll oder darf. Somit hatten weitere Faktoren, wie das Wetter oder Fahrzustände keinen Einfluss auf die Fahrzeuglängsregelung. Da die Geschwindigkeit jedoch ein wichtiger Regeleinfluss, sowohl für die Bahnplanung als auch die Querregelung ist, wurde der Fokus der Forschung im Jahr 2025 auf die dynamische Längsregelung gelegt. Ziel soll es sein ein zweidimensionales Geschwindigkeitsprofil für das Fahrzeug aufzubauen, welches neben Regelabweichungen quer zu geplanten Bahn, auch Störgrößen wie weitere dynamischen als auch statische Verkehrsteilnehmer berücksichtigt. Somit ergibt sich die geregelte Geschwindigkeit aus verschiedenen Parametern und kann somit spezifischer abgestimmt werden. Ein Autofahrer der von einer Straße gefahren ist, bremst instinktiv das Fahrzeug beim abkommen von der Straße ab. Für den Regler kann dieses Beispiel als Geschwindigkeitsregelung im Bezug auf die Querablage, also die rechtwinklige Entfernung von der geplanten Bahn, verstanden werden. Um dieses instinktive Verhalten nachzubilden, wurde eine Fensterfunktion definiert, welche über den Faktor ν zwischen 0 und 1 entsprechend das Geschwindigkeitsniveau anpassen kann. Abbildung 1 zeigt den exemplarischen Verlauf für eine Geschwindigkeit von 8 m/s. Zur Veranschaulichung wurde jeweils eine Entfernung von 10m zur geplanten Bahn als Grenze für den Stillstand (0 m/s) gewählt. Durch diese Fensterfunktion konnte das Bahnfolgeverhalten bei Planungsfehlern bereits deutlich verbessert werden. Als negativer Nebeneffekt, zeigt sich beim Starten der Automatisierung mit großem Abstand zur globalen Bahn, kann es passieren, dass trotz gültiger Regelergebnisse, das Fahrzeug stehen bleibt, weil die Geschwindigkeits-begrenzung aktiv ist. Für kontrollierte Abläufe wurde eine Möglichkeit geschaffen dieses Verhalten zu überschreiben. In der Praxis muss der vorgelagerte Prozess die sichere Ausführung sicherstellen oder den Befehl als manuellen

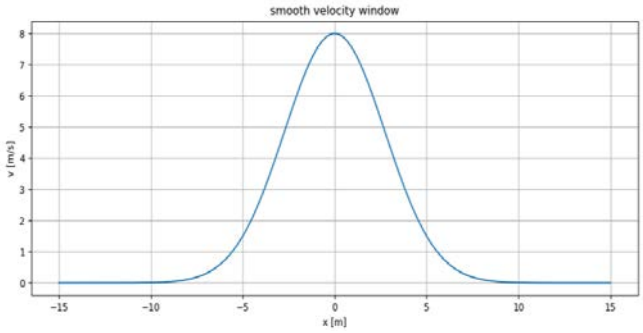


Abbildung 1: Geschwindigkeitsverlauf für die Fensterfunktion ν bei 8 m/s

Eingriff darstellen. Neben der Implementierung eine Geschwindigkeitsbegrenzung für den rechtwinkligen Abstand zur geplanten Bahn, muss auch eine vorrausschauende Geschwindigkeitsanpassung an den Fahrzugstand mit gegebenen externen Einflüssen in Fahrtrichtung gegeben werden. Als Beispiele seien hier andere Verkehrsteilnehmer oder Hindernisse auf der geplanten Bahn angeführt. Zur Bewertung der Hindernisse wird die Bahn aus der dynamischen Bahnplanung verwendet. Für alle dynamischen Objekte wird innerhalb eines einstellbaren Radius werden die Abstände zur geplanten Bahn und der euklidische Abstand zum Fahrzeug bestimmt. Die Objekte werden anschließend nach aufsteigendem euklidischem Abstand sortiert und es wird der Abstand zur geplanten Bahn ausgewertet. Sind für die Objekte auch noch die gerichteten Geschwindigkeiten bekannt, werden diese ebenfalls im in der Geschwindigkeitsanpassung berücksichtigt. Abbildungen 2 und 3 zeigen die entsprechenden Geschwindigkeitsverteilungen (normiert) für den rein statischen als auch gemischt dynamischen Fall.

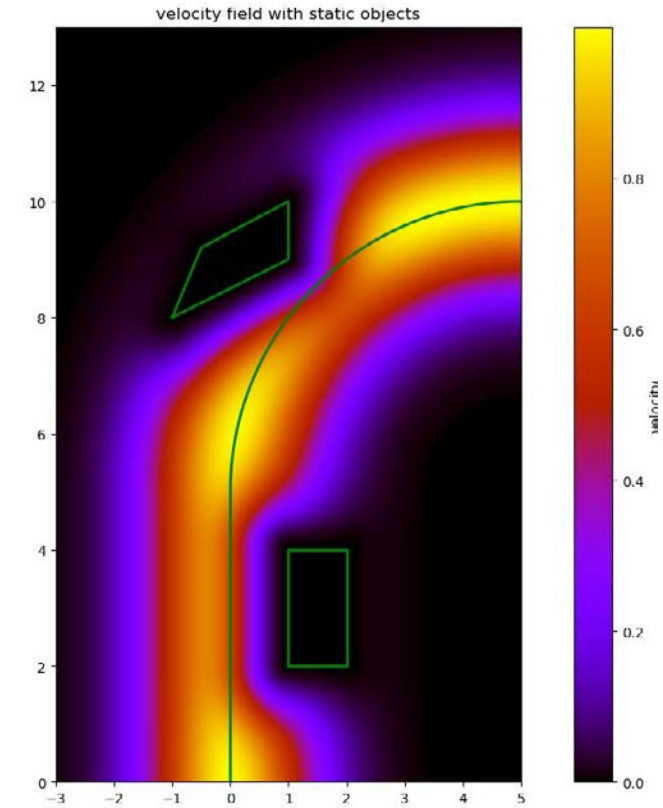


Abbildung 2: Geschwindigkeitsverteilung bei statischen Objekten

Es sind gut die Geschwindigkeitsabsenkungen aufgrund der Objekte zu erkennen. Bei dynamischen Objekten werden nur kleinere als die eigene Geschwindigkeit entsprechend richtungsabhängig betrachtet. Somit wird ein erweitertes Abstandsverhalten definiert. Es ist durchaus denkbar noch weitere Faktoren zu berücksichtigen, um die Geschwindigkeit weiter anzupassen. So kann die Geschwindigkeit beim Überholen von Fußgängern zur Erhöhung der Sicherheit kleiner ausgelegt werden als bei Fahrzeugen.

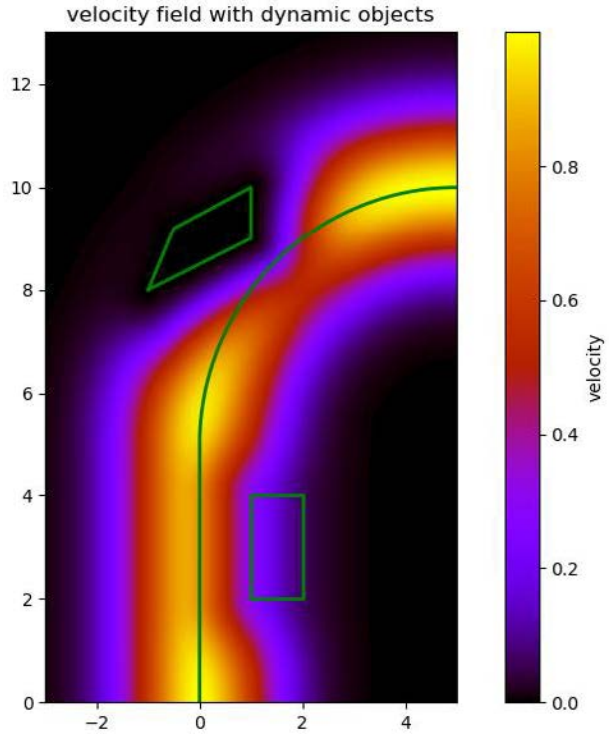


Abbildung 3: Geschwindigkeitsverteilung bei statischen und dynamischen Objekten

IV. Ergebnisse 2025

Es wurden die weiterhin bestehenden Herausforderungen bei der Bahnfolgeregelung untersucht und hierbei die Umsetzung einer dynamisch anpassbaren Geschwindigkeitsregelung entworfen. In der Simulation liefern die einzelnen Ansätze bereits gut Ergebnisse. Da zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht alle Ansätze entsprechend implementiert und in der Praxis getestet werden konnten, bleibt eine finale Bewertung offen.

V. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Die neuen Ansätze sollen im weiteren Projektfortschritt vollständig implementiert und in der Praxis testet werden. Weiterhin soll eine neue Bewertung für die drei gestellten Problembereiche durchgeführt und wenn nötig weitere Ansätze zur finalen Stabilisierung getroffen werden.

VI. Literaturverzeichnis

[1] T. Rottmann, T. Lüttel, Jahresbericht 2023, München, 2023.

***Kurzbiographie Autor* — Nach dem Studium der Luft- und Raumfahrttechnik wurde ich zum Feuerleitoffizier am Waffensystem Patriot ausgebildet. Nach meiner Anschließenden Verwendung als Chef einer Staffel und als Projektleiter eines IT-Großprojektes der Bundeswehr, wurde ich Lehroffizier mit dem Aufbau des dualen Studiums für die zukünftigen Piloten der Bundeswehr beauftragt. Nach dem Ende meiner Dienstzeit bin ich in den wissenschaftlichen Bereich gewechselt und ein Mitarbeiter im DTEC-Proekt MORE.**

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

VERNETZUNG & AUTONOMIE

Prof. Dr.-Ing. Vladislav Nenchev

Learning-based Emergency Evasion Assistance for Autonomous Vehicles

Mohak Mansharamani

I. Research focus

Recent advances in active vehicle safety increasingly rely on end-to-end learning-based control rather than purely rule-based or Model Predictive Controller (MPC) schemes, particularly for coordinated braking and steering [1]. In this context, recent work has demonstrated that end-to-end models such as Vision-Language-Action (VLA) enable unified action control [2, 3], but existing implementations primarily use cameras or heavy sensor-fusion pipelines. In contrast, Light Detection and Ranging (LiDAR) offers superior 3D mapping and localization compared to cameras while remaining more lightweight than full sensor fusion, making it well suited for safety-critical applications [4].

This project develops a LiDAR-based VLA system that generates both braking and steering commands for collision avoidance. Point clouds are encoded into spatial features, fused with language tokens, and processed by a Large Language Model to produce coordinated actions. This approach combines LiDAR's geometric accuracy and environmental robustness [5, 6] with VLA dual-action capability, providing an effective alternative to conventional active safety systems while meeting real-time deployment requirements.

II. Approach

Our approach implements a three-stage pipeline architecture for LiDAR-conditioned collision avoidance. The first stage processes raw LiDAR point clouds through a transformer-based encoder, which voxelizes sparse 3D points into pillars and generate Bird's-Eye View (BEV) feature maps. This pillar-based representation balances spatial resolution with computational efficiency, making it suitable for real-time inference.

The second stage converts the generated BEV maps into language-compatible tokens through an alignment module. This module projects high-dimensional BEV features into a lower-dimensional embedding space that matches the Large Language Model's token dimension. These LiDAR tokens are then concatenated with text tokens describing the driving task and fed into the Large Language Model (LLM) for joint spatial-linguistic reasoning.

The third stage generates coordinated action commands through a dedicated action head which will be designed to produce simultaneous braking deceleration values and steering angles, enabling the coordinated maneuvers.

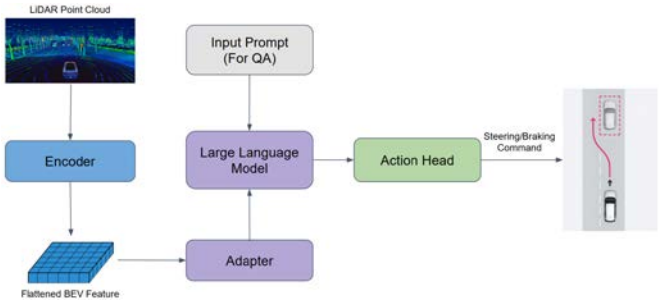


Figure 1: Proposed Pipeline.

III. Project progress

We have completed a comprehensive literature review of LiDAR-based perception methods and VLA architectures. Based on this analysis, we selected DSVT [7] as our backbone architecture and started the implementation for our platform.

The system architecture has been fully designed, including specifications for the three-stage pipeline. The development of the Visual Language Model (VLM) integration is underway and on track for completion in Q1 2026.

IV. Outlook and next steps

In 2026, the primary focus will be completing and evaluating the full pipeline. During Q1, we will finalize and test the VLM question-answering module for and evaluate its LiDAR scene understanding based on 3D captioning.

In Q2, we will implement the action head and collect LiDAR datasets tailored to collision avoidance scenarios for system training and evaluation. During Q3, the complete pipeline will be validated in closed-loop simulation with comprehensive performance analysis. In Q4, we will deploy the system on NVIDIA Jetson AGX Orin and Thor platforms for hardware-in-the-loop testing while initiating paper writing for conference submission.

References

[1] A. J. M. Muzahid, S. F. Kamarulzaman, M. A. Rahman, S. A. Murad, M. A. S. Kamal, and A. H. Alenezi, "Multiple vehicle cooperation and collision avoidance in automated vehicles: Survey and an ai-enabled conceptual framework," *Scientific reports*, vol. 13, no. 1, p. 603, 2023.

[2] X. Zhou, M. Liu, E. Yurtsever, B. L. Zagar, W. Zimmer, H. Cao, and A. C. Knoll, "Vision language mod-

els in autonomous driving: A survey and outlook," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024.

[3] C. Cui, Y. Ma, X. Cao, W. Ye, Y. Zhou, K. Liang, J. Chen, J. Lu, Z. Yang, K.-D. Liao *et al.*, "A survey on multimodal large language models for autonomous driving," in *Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision*, 2024, pp. 958–979.

[4] Q. Li, Y. Luo, S. Liu, T. Lu, L. Shi, W. Ji, Y. Han, H. Wang, and B. Nie, "Activation strategies and effectiveness of intelligent safety systems for reducing pedestrian injuries in autonomous vehicles," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 211, p. 107870, 2025.

[5] G. Zamanakos, L. Tsochatzidis, A. Amanatiadis, and I. Pratikakis, "A comprehensive survey of lidar-based 3d object detection methods with deep learning for autonomous driving," *Computers & Graphics*, vol. 99, pp. 153–181, 2021.

[6] S. Y. Alaba and J. E. Ball, "A survey on deep-learning-based lidar 3d object detection for autonomous driving," *Sensors*, vol. 22, no. 24, p. 9577, 2022.

[7] H. Wang, C. Shi, S. Shi, M. Lei, S. Wang, D. He, B. Schiele, and L. Wang, "Dsvt: Dynamic sparse voxel transformer with rotated sets," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2023, pp. 13 520–13 529.

Short biography of the author — Mohak holds a Master's degree in Robotics from TUM and a Bachelor's in electronics engineering. His research interests focus on autonomous systems, visual navigation, and localization for mobile robots. His work spans perception, control, and system integration, with experience in both classical and learning-based approaches.

Advancing Functional Reliability of Near-Field Safety Monitoring for Autonomous Emergency Braking

Junnan Pan

I. Research Focus

The work is part of the Munich Mobility Research Campus (MORE) and targets an embedded near-field active safety layer that operates alongside a High-Level Autonomy System (HLAS). A dedicated, low-mounted 3D Light Detection and Ranging Sensor (LiDAR) and a microcontroller-based monitoring module supervise a speed-dependent motion corridor in front of the vehicle and trigger Emergency Braking independently of the HLAS if a collision within the monitoring area is predicted.

The problem addressed in 2025 is twofold. Firstly, the existing near-field monitoring suffered from a high False Positive (FP) rate in straight, low-speed urban scenarios due to an oversensitive single-point hit strategy [1]. Secondly, the original parallelogram-based monitoring region caused curvature-induced blind spots on tight bends, where obstacles close to the outer corridor boundary could remain undetected. The research goal is to design monitoring strategies that (i) reliably detect relevant obstacles, (ii) significantly reduce unnecessary braking activations.

II. Methodology

We address designing an embedded active safety module as part of an autonomous-driving architecture shown in Fig. 1. The safety architecture separates a main autonomy stack from an embedded fail-safe stack. The HLAS performs perception, prediction, and motion planning using a rich sensor suite. In parallel, the Near-Field Monitoring System MORE (NeFiMMORE) uses a dedicated front LiDAR and the planned trajectory to supervise a near-field driving corridor. If an obstacle is detected within the corridor, NeFiMMORE initiates emergency braking, irrespective of the HLAS state. The active safety module uses dedicated sensors and microcontrollers. It runs alongside a HLAS, which plans trajectories on a high-performance computing platform using multimodal sensor inputs. Guaranteeing collision avoidance by the HLAS can be hindered by sensor blind spots, computational overload, or faulty functionality. To mitigate these cases, the embedded safety system provides streamlined functions: monitoring, emergency braking, and collision avoidance/mitigation.

For straight, low-speed urban roads, three computationally efficient strategies were implemented on the embedded platform [1]:

- **Dynamic spatial range adaptation:** The longitudinal monitoring distance is modeled as reaction distance plus safety margin plus braking distance. The braking distance is computed from vehicle speed, friction coefficient, and road slope. Together with lateral and vertical bounds derived from vehicle geometry, this defines a 3D corridor that restricts LiDAR processing to the physically relevant volume.
- **Size-based object filtering:** Point clouds are clustered using Euclidean distance and approximated by axis-aligned bounding boxes. Clusters are considered obstacles only if at least one dimension exceeds a configurable threshold (0.3 m), which preserves traffic participants while suppressing tiny objects such as insects or small debris.
- **Motion-aware predictive monitoring:** In car-following scenarios, clusters are associated over time and relative longitudinal velocity is estimated. Objects whose distance is constant or increasing are considered non-critical, even when they temporarily enter the spatial corridor; objects closing in within the braking distance trigger AEB.

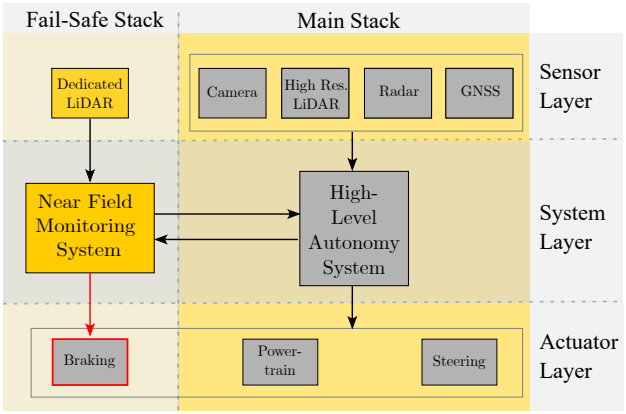


Fig. 1. Architecture of HLAS and embedded near-field monitoring system with motion corridor.

On curved roads, the focus is on eliminating blind spots while preserving the low algorithmic complexity required on microcontrollers. For this, Predictive Motion Corridor Monitoring (PMCM) was developed. The planned trajectory is represented in a Frenet frame, and the vehicle is modeled by four corner points. Sliding-window extrema over the corner tracks yield left and right corridor boundaries that tightly over-approximate the reachable body envelope across curvature regimes.

The corridor boundaries are transformed into the LiDAR frame, limited to the forward region and to a distance equal to the braking distance, and then reduced to a visible boundary by filtering out self-occluded and cross-occluded points. The

TABLE I. COMPARISON OF FALSE NEGATIVE RATE (FNR), TRUE POSITIVE RATE (TPR), F1-SCORE BETWEEN THE SINGLE-POINT HIT STRATEGY AND SIZE-BASED OBJECT FILTER STRATEGY.

Measures	Single-point Hit	Size-based Object Filter
FNR	70%	**0%** ↓
TPR	100%	**100%** ↑
F1-score	66.67%	**100%** ↓

TABLE II. COMPARISON OF FALSE POSITIVE RATE (FPR) BETWEEN THE SIZE-BASED OBJECT FILTER STRATEGY AND MOTION-AWARE STRATEGY.

Scenario	Size-based filter	Motion-aware
Constant-Gap	46.7 %	**4.2** % ↓
Increasing-Gap	28 %	**0** % ↓

remaining boundary points are ordered by azimuth. For each pair of successive boundary vertices and the sensor origin, a triangle window is formed; LiDAR points are kept only if they lie inside one of these triangles. Distance-based pre-filtering avoids expensive checks for clearly out-of-range points. All operations scale linearly with the number of corridor samples and LiDAR points, ensuring real-time feasibility.

III. RESULTS 2025

The evaluation followed a staged approach: (i) validation of the simulation environment, (ii) quantitative assessment of FP reduction on straight roads, and (iii) assessment of coverage and collision avoidance on curved roads.

A Gazebo-based simulation of a Velodyne VLP-16 was validated against laboratory measurements with the real sensor in an inverted mounting configuration. A cuboid target at distances from 1.2 m to 7.8 m was used to compare the number of hits and point distributions. The close match between simulation and measurement confirmed that the virtual sensor model is adequate for evaluating the monitoring strategies [1].

For straight-road scenarios, cube targets of different sizes and distances were used to evaluate the size-based filter. Compared to the original single-point hit strategy (TPR 100 %, FPR 70 %), the size-based filter maintained a TPR of 100 % while reducing the FPR to 0 %, yielding an F1-score of 100 % in the tested range. In car-following scenarios without true collisions, motion-aware monitoring substantially reduced unnecessary braking: in constant-gap driving, the FPR dropped from 46.7 % (size-based only) to 4.2 %, and in increasing-gap driving from 28 % to 0 % [1].

On curved roads, PMCM was compared against the earlier parallelogram-based monitoring and a simplified two-point corridor filter in controlled collision-driving simulations. A cylindrical obstacle at the outer corridor boundary and circular tracks with radii from 6 m to 26 m (plus a straight baseline) were used. Both PMCM and the parallelogram filter achieved 0 % FNR, but the parallelogram approach exhibited a collision rate of 36.1 % because obstacles were detected too late. PMCM reduced the collision rate to 0 %, confirming

TABLE III. COMPARISON OF FNR AND TPR BETWEEN DIFFERENT MONITORING FILTERING STRATEGIES.

Measures	Parallelogram Filtering	Two-point Corridor Filtering	PMCM
FNR	0%	57.74%	**0%** ↓
TPR	100%	42.26%	**100%** ↑
collision rate	36.1%	1.03%	**0%** ↓

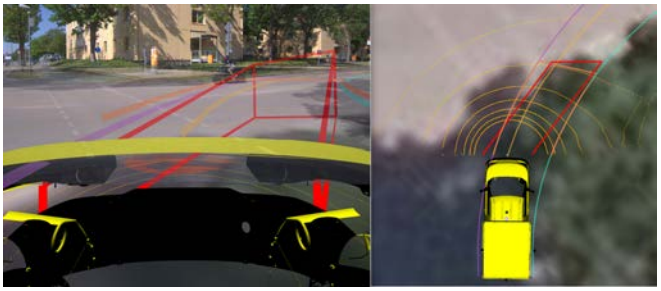


Fig. 2. Monitoring corridor based on the autonomous driving data.

that the curvature-aware corridor removes blind spots while preserving detection performance. The two-point corridor filter also kept the collision rate low but suffered from a high FNR (57.74 %), particularly at small radii.

A qualitative evaluation on recorded urban campus driving data showed that the PMCM corridor remains stable and aligned with the vehicle envelope despite realistic sensor noise and localization drift, and that it adapts smoothly to changes in curvature. A test driving snippet is represented in Fig. 2. These findings confirm the reliability of the proposed method when applied to real-world data.

IV. OUTLOOK AND NEXT STEPS FOR 2026

In 2026, the main goal is to integrate the straight-road strategies and the PMCM approach into a unified near-field safety stack and deploy it on the project vehicle. This will include porting the algorithms to the target microcontroller platform, optimizing memory and arithmetic (e.g., fixed-point implementations where appropriate), and conducting timing analyses to obtain hard bounds on worst-case execution time. Integrated vehicle experiments on the campus test track will combine straight segments, curves, intersections, and vulnerable road users to characterize system-level behavior and to calibrate thresholds and safety margins.

REFERENCES

[1] J. Pan, P. Sotiriadis, V. Nenchev, and F. Englberger. Improving Functional Reliability of Near-Field Monitoring for Emergency Braking in Autonomous Vehicles. arXiv.org. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2507.15594v1

***Short Biography Author*— The author is a researcher in the field of autonomous driving and embedded active safety systems at the Munich Mobility Research Campus (MORE). His research interests include LiDAR-based near-field monitoring, motion corridor modeling on straight and curved roads, and functionally safe emergency braking on microcontroller platforms. Within the MORE project, the author is responsible for the design, implementation, and experimental evaluation of an independent near-field safety layer for autonomous vehicles.**

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

VERNETZUNG & AUTONOMIE

Prof. Dr. rer. nat. Antje Neve

Dominic Karnehm

KI-Gestützte Temperature Zustandsbestimmung und Controlling Rekonfigurierbarer Batteriesysteme

I. Forschungsschwerpunkt

Effizienz und Sicherheit sind zwei der Schwerpunkte der Batterieforschung. Die Temperatur der Batterien beeinflusst beide Faktoren signifikant. So ist die Innentemperatur ein sicherheitsrelevanter Faktor, wenn es um die Gefahr des thermischen Durchgehens geht. Neben diesem Worst-Case beeinflusst die Innentemperatur auch den Ladezustand und die Alterung der Batterie. Für einen optimalen Betrieb ist die Batterie innerhalb des Temperaturfensters von 15 °C bis 40 °C zu betreiben. Da die Innentemperatur nicht direkt messbar ist, sind Methoden zur Temperaturschätzung zu entwickeln. Neben der direkten Innentemperatur lassen sich auch aufgrund der Temperaturverteilung Erkenntnisse über den Zustand schließen. Im Rahmen der Forschung wurden im Jahr 2025 mit dem Kolmogorov-Arnold Network (KAN), dem iTransformer und dem Fourier-Neuralen Operator (FNO) drei Methoden zur Innentemperaturschätzung, zur Temperaturvorhersage sowie zur Temperaturverteilung vorgestellt. Da die notwendige Rechenkapazität der Methoden hoch ist und eine Real-Time-Berechnung nicht erforderlich ist, eignen sie sich für die Implementierung als Cloud-basierte Zustandsbestimmung.

Neben der Temperatur hat auch die Topologie und die Steuerung einen signifikanten Einfluss auf die Effizienz des Batteriesystems. Im letzten Jahr wurde begonnen, die Verluste konventioneller Batteriesysteme mit denen einer rekonfigurierbaren, variablen Gleichstromquelle zu vergleichen, um die Vor- und Nachteile eines rekonfigurierbaren Ansatzes zu evaluieren. Des Weiteren wurde die Zustandsbestimmung und Steuerung in Kombination mit Cloud Computing in Bezug auf Latenz und Bandbreite evaluiert.

II. Vorgehensweise

Im Jahr 2024 wurden bereits Innentemperaturmessungen durchgeführt. Diese Daten konnten, ergänzt um Messdaten von Kooperationspartnern, für die Erstellung der KI-Modelle als Trainingsdaten genutzt werden. Um das Ziel der Generalisierbarkeit sowie der zeitlichen Vorhersage der Temperaturen zu ermöglichen, wurde die Fragestellung in einzelne Problemstellungen aufgeteilt. Nach der Aufteilung wurden mit dem Kolmogorov-Arnold Network (KAN) [1], [2], dem iTransformer [3] und dem Fourier-Neuralen Operator (FNO) [4] drei Methoden evaluiert, um die Innentemperatur zu schätzen und vorherzusagen.

Für die Effizienzanalyse wurde in einem ersten Schritt ein Versuchsaufbau mit einer programmierbaren Last durchgeführt. Dieser ist in Abbildung 1 dargestellt. Mittels dieses Aufbaus war es möglich, ein einfaches System, bestehend aus 12 Batterien, in Bezug auf die Effizienz als rekonfigurierbare Batterie und konventionelle Batterie zu analysieren [5]. Der Aufbau wurde auch genutzt, um Latenz und die notwendige Bandbreite für ein vollständiges und ein teilweises cloud-based BMS während eines Experiments zu analysieren [6]. Die Erkenntnisse aus diesem Aufbau wurden für eine Weel-to-Tank-Analyse genutzt. Dabei wird in Zukunft eine umfassende Verlustanalyse einer rekonfigurierbaren Batterie im Vergleich zum konventionellen Ansatz durchgeführt. So wird es uns möglich sein, eine Aussage dazu zu treffen, mit welchem System am Ende ein Fahrzeug mit derselben Ladung mehr Strecke zurücklegen kann.

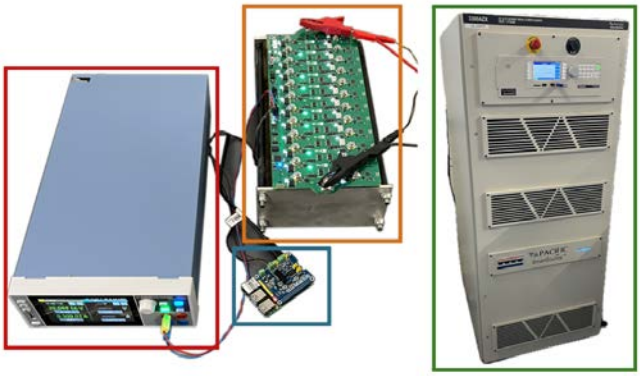


Abbildung 1: Effizienzanalyse: Experimenteller Aufbau; rekonfigurierbaree Batterie (orange), Spannungsquelle (rot), programmierbare Last (grün), Steuereinheit (blau) [5]

III. Ergebnisse 2025

A. Temperatur Zustandsbestimmung

In [1] haben wir ein Kolmogorov-Arnold Network (KAN) und ein interconnected LSTM vorgestellt. Die Methoden zeigen mit einem Mittleren-Absoluten-Fehler (MAE) von 0,598°C/0,887°C (Innenteperatur) und 0.481°C/1,030°C (Oberflächentemperatur) für KAN und interkonnected LSTM über den gesamten UDDS Fahrzyklus zeigt vor allem KAN ein hohes Potenzial um ohne die Verbauung zusätzlicher Sensoren die Innen- und Oberflächentemperatur akkurat vorherzusagen. Physikalisch Informierte Systeme gelten als vielversprechende Methodik um die datengetriebene Methodik der künstlichen Intelligenz und physikalische Modelle, welche auf Modellparametern basieren, zu kombinieren. In unserem Paper [2] haben wir den Einsatz von Physikalisch-Informierten Neuralen Netzen (PINN) in Kombination mit KAN für die Innen- und Oberflächentemperaturschätzung analysiert. Es wurde der Ansatz der Parameter-Losen PINN-KAN gewählt. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich KAN als PINN Architektur in diesem Anwendungsfall nicht eignet. Auch die Ergebnisse, die mit einem klassischen FNN erreicht wurden weisen auf eine Abnahme der Genauigkeit hin. Mit iTransformer [3] wurde ein Modell vorgestellt, welches den Innentemperaturverlauf eine Minute im Voraus mit einer Genauigkeit von 0,20°C RMSE über einen UDDS Fahrzyklus hinweg vorhersagen kann.

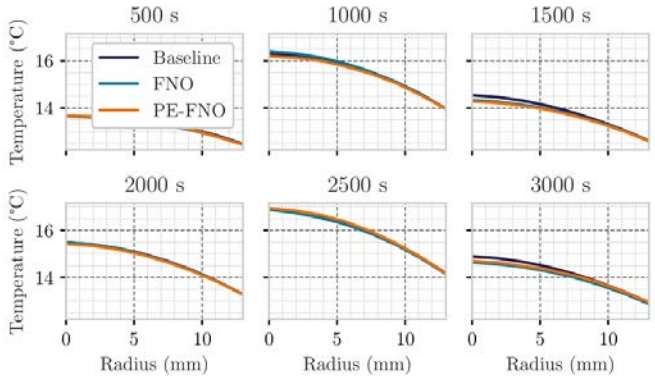


Abbildung 2: Temperaturverteilungsschätzung mit FNO (blau) und PE-FNO (orange) über LA92 bei 10°C Kühltemperatur

FNO ermöglicht die Vorhersage der Temperaturverteilung mit einem RMSE von 0,05 °C bei Simulationsdaten über Kühltemperaturen von 0 °C – 40 °C und die Fahrzyklen HWFET und LA92 hinweg [4]. Parameter-Embedding FNO (PE-FNO) ermöglicht die Generalisierung von Schätzmethoden, indem Batterieparameter als Eingabeparameter genutzt werden. Es konnte ein RMSE von 0,06 °C über die gleichen Experimente, wie FNO erzielt werden. Abbildung 2 zeigt die Temperaturverteilung über den Fahrzyklus LA92 bei 10°C. Die geringe Verschlechterung der Genauigkeit lässt sich durch die erhöhte Generalisierung begründen. Die Analyse mittels experimenteller Daten mit Innen- und Oberflächentemperaturen bestätigen das Potenzial von FNO und PE-FNO. Hier konnte eine Genauigkeit von 0,09 °C und 0,12 °C erreicht werden, womit die vergleichbaren Kerntemperaturschätzer in der Genauigkeit übertroffen wurden.

B. Reconfigurable Battery

Datenbandbreite und Latenz sind entscheidende Parameter, wenn es zu Cloud-basierten BMS kommt. Der Vergleich der Latenz einer Public-Cloud und einem Campus-Deployment zeigen, innerhalb Deutschlands zeigt sich kein deutlicher Unterschied [6]. Sollte es zu einer Implementierung eines Cloud-basierten BMS kommen, ist ein hybrider Ansatz zu empfehlen. Die verlustbehaftete Kompression konnte die zu übertragende Datenmenge effektiv um 77,1% und 64,7% für konventionelle und rekonfigurierbare Batterien verringern.

Die Effizienz eines Motors und eines Wechselrichters ergibt sich vor allem durch ihren jeweiligen Innenwiderstand. Die Verlustleistung am Innenwiderstand steigt quadratisch mit dem Strom. Dadurch ergibt sich, lässt sich der Strom über den gesamten Entladeprozess eines Batteriesystems gering halten, so ist von einer Effizienzsteigerung auszugehen. Rekonfigurierbare Gleichspannungsbatterien ermöglichen genau dies. Die Analyse des Ausgangsstroms eines konventionellen Systems und einer Rekonfigurierbaren Batterie bei konstanter Leistung zeigt eine 10% Verringerung des RMSE Stroms über die gesamte Entladung [5]. Auch in Simulationen zeigt sich die Verringerung des RMSE Stroms 3.0 % und um 28.7 % im Peak-Strom bei gleicher Energiedichte.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Die nächsten Schritte bestehen darin, die Effizienzanalyse der rekonfigurierbaren Batteri vortzuführen. Es ist die Tank-to-Wheel-Effizienz zu ermitteln, indem am Prüfstand, bestehend aus Batteriesystem, Umrichter und Motor, Leistungsanalysen durchgeführt werden. Hier ist zu prüfen, ob Motorverluste in dem Maße verringert werden können, in welchen Schaltverluste durch Rekonfiguration kompensiert werden oder im best-case übertroffen.

Des Weiteren ist für die Temperaturvorhersage ein Aufbau durchzuführen, bei dem Temperaturverhalten im Inneren von Batteriesystemen erfasst werden können, um so das Modell zur Innentemperaturschätzung von einzelnen Batterien auf Batteriesysteme zu übertragen.

V. Literaturverzeichnis

[1] D. Karnehm, A. Samanta, C. Rosenmüller, A. Neve, and S. Williamson, “Core Temperature Estimation of Lithium-Ion Batteries Using Long Short-Term Memory (LSTM) Network and Kolmogorov–Arnold Network (KAN),” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 11, no. 4, pp. 10391–10401, Aug. 2025, doi: 10.1109/TTE.2025.3559633.

[2] D. Karnehm and A. Neve, “Core Temperature Estimation of Lithium-Ion Batteries Using Physics Informed Neural Network and Kolmogorov-Arnold Network,” in *IECON 2025 – 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 2025, pp. 1–6. doi: 10.1109/IECON58223.2025.11221787.

[3] A. Samanta, D. Karnehm, M. Sharma, A. Neve, and S. Williamson, “Thermal Behavior Forecasting for Battery Management Systems Using iTransformer and Kolmogorov–Arnold Network,” in *IECON 2025 – 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 2025, pp. 1–6. doi: 10.1109/IECON58223.2025.11221577.

[4] D. Karnehm, Y. Zheng, A. Neve, and R. Teodorescu, “Generalizable Fourier Neural Operator for Estimation of Lithium-Ion Battery Temperature Distribution,” Dec. 19, 2025, *Social Science Research Network, Rochester, NY*: 5940916. doi: 10.2139/ssrn.5940916.

[5] D. Karnehm, J. Estaller, M. Kuder, A. Neve, and T. Weyh, “Performance Comparison of a Full-Bridge Based Reconfigurable and Conventional Battery Storage System,” in *2025 IEEE 34th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Jun. 2025, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISIE62713.2025.11124692.

[6] D. Karnehm, A. Samanta, A. Neve, and S. Williamson, “Pioneering Cloud-enhanced Real-time Control of Modular-Multilevel Reconfigurable Battery Packs for Automotive Applications,” in *2025 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition Asia (ECCE-Asia)*, May 2025, pp. 1–6. doi: 10.1109/ECCE-Asia63110.2025.11112440.

Zustandsbestimmung von Lithium-Ionen-Zellen durch maschinelle Lernmethoden

Sebastian Pohlmann

I. Forschungsschwerpunkt

Um die Klimaziele zu erreichen, muss der Transportsektor auf erneuerbare Energien umsteigen. Eine Technologie, die maßgeblich am Erfolg des Umstiegs beteiligt ist, sind Lithium-Ionen-Zellen. Sie sind die Schlüsseltechnologie als elektrochemischer Energiespeicher für diverse Anwendungen in der Unterhaltungselektronik bis hin zur Energiespeicherung bei Batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) [1]. Grund dafür sind die hohen Energie- und Leistungsdichten bei einer gleichzeitig hohen Zyklenfestigkeit [2]. Dennoch müssen die Entwicklung und besonders der Betrieb weiter optimiert werden, um die Konkurrenzfähigkeit gegenüber konventionellen Verbrennerfahrzeugen zu gewährleisten. Da Lithium-Ionen-Batterien komplexe elektrochemische Systeme sind, die stark von den Umgebungs- und Belastungsbedingungen abhängig sind, ist die Zustandsbestimmung erschwert [3]. Während Batterieparameter, wie Strom, Spannung und Temperatur, messbar sind, sind die Zustände, wie der State-of-Charge (SoC) oder der State-of-Health (SoH), nicht direkt messbar. Die genaue Schätzung dieser Zustände ist aber von höchster Relevanz, um Sicherheit, Langlebigkeit sowie einen effizienten und robusten Betrieb des Batteriesystems sicherzustellen. Ziel der Forschung ist es, die Zustandsbestimmung durch datengetriebene Modelle zu optimieren, um somit den Betrieb eines Batteriesystems zu verbessern.

II. Vorgehensweise

Im speziellen wurden im vergangenen Jahr auf die Bestimmung des SoH und der Impedanz eingegangen. Zuerst wurde ein Schätzmodell für den SoH mit einem Verfahren des automatischen Maschinellen Lernens (AutoML) erstellt. Es wird anhand von Strom und Spannungsdaten trainiert und soll ohne weiteren Entwicklungsaufwand den SoH schätzen. Anschließend wird die Performance hinsichtlich Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit mit einer selbst entwickelten Support Vector Machine (SVM) verglichen.

Zusätzlich wurde der Zusammenhang zwischen der Impedanz und der Kapazität einer Lithium-Ionen-Zelle verglichen. Eine elektrochemische Impedanz Spektroskopie (EIS) gibt Aufschluss über die einzelnen chemischen Prozesse innerhalb der Batteriezelle. Eine Messung kann auch dafür genutzt werden, um die verbleibende Kapazität über den Widerstand zu schätzen. Während die Kapazität über den Lebenszyklus abnimmt, steigt dagegen die Impedanz. Da die Impedanz aber stark von den Umgebungsbedingungen und den Batterieparametern abhängig ist, wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert. Deshalb soll der passende Zeitpunkt für eine EIS-Messung identifiziert werden, an dem der Zusammenhang zwischen Kapazität und Impedanz am größten ist. Aufbauend darauf sollen die Daten dieser Messung genutzt werden, um den SoH der Batteriezellen mithilfe der Impedanzdaten zu schätzen. Die Vorgehensweise von der Auswahl der Daten bis hin zur Evaluierung der Modelle ist in folgender Abbildung dargestellt.

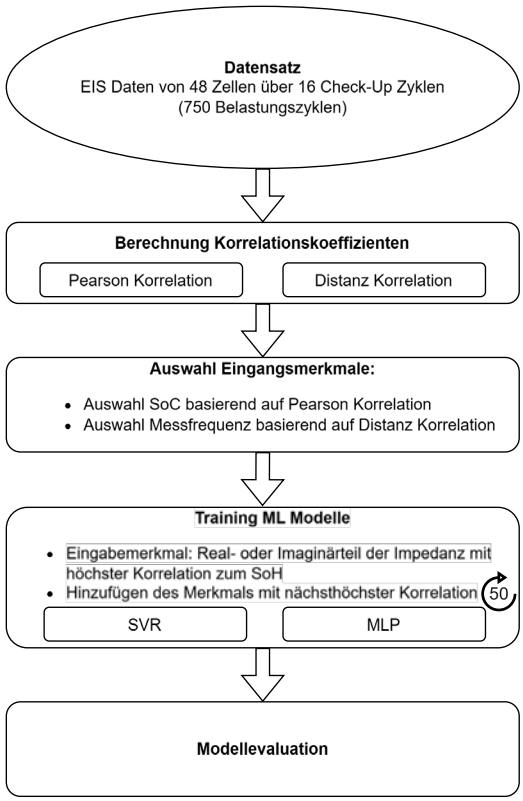


Abbildung 1: Vorgehen zur datengetriebenen Bestimmung des SoHs von Lithium-Ionen-Batterien mithilfe der Impedanz. Die Auswahl der Merkmale basiert auf der Analyse der Korrelationskoeffizienten.

III. Ergebnisse 2025

Zuerst werden die Ergebnisse des AutoML zur Schätzung des SoHs dargestellt. Die Genauigkeiten sind in Abbildung 2 für zwei Testzellen visualisiert. Für diese zwei Zellen, die nicht für das Training des Modells verwendet wurden, ergeben sich folgende Fehlerwerte.

Tabelle 1: Ergebnisse der Testzellen bei der SoH Schätzung mit dem AutoML Modell.

Zelle	MAE in %	RMSE in %	R2
CS2-33	0,833	1,088	0,972
CS2-37	0,878	1,229	0,938
Insgesamt	0,855	1,160	0,961

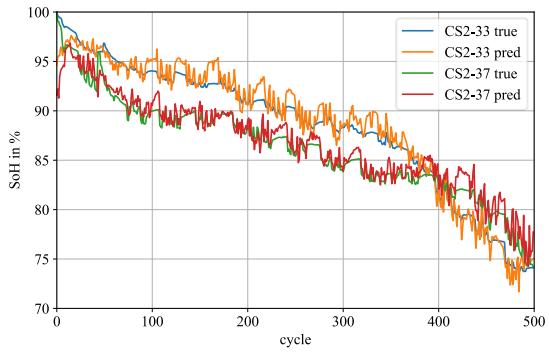


Abbildung 2: Testergebnisse des AutoML Modells zur Schätzung des SoH von zwei Lithium-Ionen-Zellen aus einem öffentlichen Datensatz [4].

Neben der Genauigkeit des Modells wurde auch die Rechenzeiten für die Schätzung des SoHs bestimmt. Diese wird mit der selbst entwickelten SVM verglichen. Beide Modelle wurden auf der AWS-Instanz ml.m5.24.xlarge getestet. Der Vergleich ist in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Inferenzzeiten des AutoML Modells im Vergleich zu der selbstentwickelten SVM.

Model	Inferenzzeit Test
SVM	0,089 s
AutoML	0,103 s

Es zeigt sich, dass das AutoML Modell nur geringfügig langsamer ist als eine simple SVM. Obwohl das AutoML Modell mit Fehlerwerten um die 1% gute Ergebnisse zeigt, muss es im Vergleich zu anderen datengetriebenen Modellen, bei dem Expertenwissen bei der Entwicklung angewendet wird, noch weiter optimiert werden [4].

Das zweite Modell schätzt den SoH basierend auf Impedanzdaten. Dafür werden zuerst die Korrelationen zwischen Kapazität und Impedanz an verschiedenen Batteriezuständen berechnet. Dabei fällt auf, dass die höchsten Korrelationen bei einem Ladezustand von 10% vorhanden sind. Die Impedanzdaten dieses Zustandes werden verwendet, um eine SVM zu trainieren und zu testen. Die Ergebnisse des Tests des Modells für eine beispielhafte Zelle ist in Abbildung 3 dargestellt.

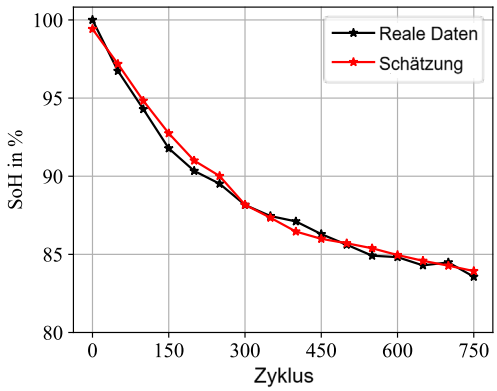


Abbildung 3: Vergleich zwischen dem realen Alterungsverlauf einer Batteriezelle und den Ergebnissen des Schätzmodells basierend auf den Impedanzdaten der Lithium-Ionen-Zelle [5].

Der durchschnittliche Testfehler des Modells beträgt 0,86%. Besonders zeigt sich aber, der Einfluss der Datenvorverarbeitung. Dadurch konnte der Fehler des Schätzmodells mehr als halbiert werden. Die Datenauswahl und -vorverarbeitung ist somit von gleicher Relevanz wie die Optimierung des finalen Schätzmodells.

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Das entscheidende Problem bei der datengetriebenen Zustandsbestimmung von Lithium-Ionen-Batterien ist die hohe Abhängigkeit zu den Daten. Aufgrund von schier unendlichen Möglichkeiten an Kombinationen von Belastungs- und Umgebungsbedingungen existiert kein allumfassender Datensatz. Ziel für das nächste Jahr ist die weitere Optimierung der Modelle und die Analyse der Modelle und Experimente, um mit möglichst wenigen Batterieexperimenten Datensätze zu produzieren, die möglichst viele Anwendungsfälle abbilden.

V. Literaturverzeichnis

[1] W. Bernhart, Challenges and opportunities in lithium-ion battery supply, in: Future Lithium-ion Batteries, The Royal Society of Chemistry, 2019, pp. 316–334. doi: 10.1039/9781788016124-00316.

[2] A. Kwade, W. Haselrieder, R. Leithoff, A. Modlinger, F. Dietrich, K. Droeder, Current status and challenges for automotive battery production technologies, Nature Energy 3 (4) (2018) 290–300. doi:10.1038/s41560-018-0130-3.

[3] Akash Basia, Zineb Simeu-Abazi, Eric Gascard, Peggy Zwolinski, Review on state of health estimation methodologies for lithium-ion batteries in the context of circular economy, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 32 (2021) 517–528. doi:10.1016/j.cirpj.2021.02.004. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581721000249

[4] S. Pohlmann, A. Wiedenmann, D. Karnehm, M. Kuder, A. Neve, and T. Weyh, "Automated machine learning for estimating the state of health of lithium ion batteries," in 2025 IEEE/AIAA Transportation Electrification Conference and Electric Aircraft Technologies Symposium (ITEC+EATS), 2025, pp. 1–5.

[5] S. Pohlmann, A. Mashayekh, J. Buberger, J. Estaller, A. Wiedenmann, M. Kuder, A. Neve, T. Weyh, Correlation analysis and feature extraction using impedance spectroscopy over aging of lithium ion batteries, Journal of Energy Storage 105 (2025) 114715. doi:10.1016/j.est.2024.114715.

***Kurzbiographie Autor* — Sebastian Pohlmann, geb. 1996, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität der Bundeswehr München. Studium des Maschinenwesens an der Technischen Universität München 2014 bis 2020. Seit 2021 Promotion an der Fakultät für Elektrische Energiesysteme und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München.**

Nachhaltige Mobilität durch Elektrifizierung von Bestandsfahrzeugen mittels Multi-Level-Antrieben

Andreas Wiedenmann

***Kurzfassung*— Die Forschungsarbeit adressiert die Elektrifizierung von Bestandsfahrzeugen als Ansatz zur schnellen und ressourcenschonenden Reduktion von Emissionen im Verkehrssektor. Im Fokus steht ein Multi-Level-Antriebssystem, das durch modulare Integration zentraler Antriebskomponenten eine robuste, kosteneffiziente und skalierbare Umrüstung bestehender Fahrzeuge ermöglicht. Ein wesentlicher Hebel ist die Fähigkeit, umgerüstete Fahrzeuge mit lokal erzeugter erneuerbarer Energie (insbesondere Solarenergie) zu laden.**

Zur Umsetzung werden technologische Anpassungen (Hardware/Software und Integrationskonzepte), ökologische Bewertung, ökonomische Machbarkeit sowie Anforderungen an Akzeptanz und Infrastruktur gemeinsam betrachtet. Ziel ist eine praktikable Gesamtlösung, die technische Innovation mit realer Umsetzbarkeit im Bestand verbindet.

I. Forschungsschwerpunkt

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts liegt ein zentraler Schwerpunkt auf der umfassenden Analyse und Entwicklung des Elektrifizierungsprozesses im Verkehrssektor. Dabei werden verschiedene Aspekte berücksichtigt, um eine nachhaltige und effiziente Integration von Multi-Level-Antrieben in bestehende Fahrzeuge zu gewährleisten.

1. Bedarfsanalyse und Technologieoptimierung:

Der Forschungsprozess beginnt mit einer eingehenden Untersuchung des Bedarfs für Fahrzeugumrüstungen. Eine detaillierte Analyse des Fahrzeugbestands und des Nutzungsverhaltens in verschiedenen Ländern bildet die Grundlage. Diese Erkenntnisse werden genutzt, um die Multi-Level-Antriebstechnologie zu optimieren und an die spezifischen Anforderungen des Nutzungsverhaltens anzupassen. Der Schwerpunkt liegt auf der Effizienz und Sicherheit dieser Technologie, die in den Designentwurf eines Fahrzeugs integriert wird.

2. Integration in bestehende Fahrzeuge:

Besonderes Augenmerk wird auf die nahtlose Integration der Multi-Level-Antriebe in bestehende Fahrzeuge gelegt. Dabei werden Designentwürfe und Umsetzungen anhand von Versuchsfahrzeugen präsentiert, um die praktische Umsetzbarkeit und Funktionalität zu demonstrieren.

3. Nachhaltigkeitsaspekte:

Um die Nachhaltigkeit des Elektrifizierungsprozesses sicherzustellen, werden Verbrauchsmessungen und CO_2-Lebenszyklusanalysen durchgeführt. Ziel ist es, den CO_2-Fußabdruck des gesamten Elektrifizierungsprozesses zu ermitteln. Zusätzlich wird erforscht, inwiefern die Nutzung erneuerbarer Energiequellen, wie beispielsweise Solar, den CO_2-Ausstoß weiter reduzieren kann.

4. Wirtschaftlichkeitsanalyse:

Im Bereich der Wirtschaftlichkeit erfolgt eine umfassende Untersuchung der Kosten, die mit dem Umbau von Fahrzeugen auf elektrischen Antrieb verbunden sind. Hierbei werden nicht nur die Umbaukosten betrachtet, sondern auch die Betriebskosten im Vergleich zu konventionellen Antrieben analysiert.

5. Flottenüberwachung und IoT-Integration:

Abschließend wird die Flottenüberwachung der Fahrzeuge als IoT-Device betrachtet. Hierbei werden die Möglichkeiten von Cloud-Anbindungen und datengetriebenen Zustandsprognosen erforscht, um eine effiziente und vorausschauende Flottenverwaltung zu ermöglichen.

II. Stand der Technik

Aktuell besteht die problematische Praxis, dass veraltete und umweltbelastende Fahrzeuge ins Ausland exportiert werden, anstatt vor Ort eine umweltfreundliche Umrüstung durchzuführen. Diese Vorgehensweise trägt nicht nur zur globalen Umweltbelastung bei, sondern verhindert auch, dass lokale Gemeinschaften im globalen Süden selbstständig ihre Fahrzeuge auf nachhaltige Weise umrüsten können.

Die begrenzten sinnvollen Umrüstungsmöglichkeiten für alte Fahrzeuge sind global ein Problem. Aufgrund wirtschaftlicher und technischer Hürden ist die konventionelle Elektro-Umrüstung in vielen Fällen nicht umsetzbar. Hier kommt die Bedeutung von Multi-Level-Antriebssystemen als entscheidender Enabler ins Spiel.

Die Modularität von Multi-Level-Systemen eröffnet innovative Wege zur Umrüstung veralteter Fahrzeuge, auch durch Personen ohne umfassende technische Ausbildung. Der Wegfall von Onboard-Chargern und die Integration verschiedener Antriebskomponenten vereinfachen den Umrüstungsprozess erheblich. Dieser fortschrittliche Ansatz ermöglicht es, dass auch Menschen im globalen Süden ihre Fahrzeuge selbstständig und kostengünstig auf moderne Elektroantriebe umrüsten können.

Ein weiterer entscheidender Vorteil von Multi-Level-Systemen besteht in den vielfältigen Lademöglichkeiten. Die Integration solcher Systeme erlaubt nicht nur das Laden an herkömmlichen Ladestationen, sondern bietet auch die Möglichkeit, Fahrzeuge an lokalen solaren Energiequellen aufzuladen. Dies trägt nicht nur zur Umweltfreundlichkeit bei, sondern ermöglicht auch eine dezentrale Energieversorgung in Regionen, in denen herkömmliche Infrastruktur limitiert ist.

Insgesamt fungieren Multi-Level-Antriebssysteme als Schlüsseltechnologie, die es Gemeinschaften im globalen Süden ermöglicht, ihre Fahrzeuge selbstständig und nachhaltig umzurüsten. Die Modularität, der Wegfall von Onboard-Chargern, die gesteigerte Effizienz und die vielfältigen Lademöglichkeiten machen sie zu einem zentralen Enabler, um lokale Mobilität umweltfreundlich zu gestalten und gleichzeitig technische Barrieren zu überwinden.

III. Vorgehensweise und Ergebnisse 2025

A. Messautomatisierung (Zelleingangstest)

Im Jahr 2025 wurde die Messautomatisierung des Zelleingangstests von der Entwicklungs- in die Betriebsphase überführt: Der Test läuft im Regelbetrieb und die Vermessung einer großen gelagerten Zellpopulation ist in vollem Gange. Dafür wurde ein geführtes Tool entwickelt, das den Operator-Workflow (Scannen, Wiegen und anschließendes Einlegen) durchgängig führt. Beim Einlegen wird eine Fehlererkennung in den Zellhaltern genutzt, um Fehlbelegungen bzw. Kontaktprobleme frühzeitig zu detektieren; anschließend erfolgt die detaillierte Vermessung der Zellen. Mittlerweile wurden nahezu 2000 Zellen vermessen.

Parallel wird die datengetriebene Auswertung weiter ausgebaut, u. a. Korrelationen und Feature-Extraktion mittels Impedanzspektroskopie [1] sowie automatische Modellselektion zur SoH-Schätzung [2]. Viele hardwarebedingte Probleme im Messsystem wurden durch Vor-Ort-Termine mit Rohde & Schwarz geklärt und in einen stabilen Betrieb überführt.

B. Multi-Level-Integration (V3)

Der Schwerpunkt der Multi-Level-Integration lag 2025 auf der Weiterentwicklung der dritten Modul-Generation (V3): Platineniterationen, Layout- und Schaltplan-Design sowie wiederholte Inbetriebnahmen. Mechanisch wurden Gehäuse- und Integrationsdetails (u. a. Lightpipe) per CAD weiterentwickelt. Aktuell liegt REV2.1 vor; der volle Batch wird sehr zeitnah bestellt.



Abb. 1. V3-Modul (REV2.1): Rendering Modulgehäuse mit Anschlüssen und Lightpipe

Begleitend wurden zentrale Aspekte der Multi-Level-Topologie und des reconfigurable-battery Betriebs experimentell und vergleichend untersucht, u. a. Verlustvergleiche BM3 vs. Two-Level [3] sowie Simulation und Validierung reconfigurable battery Konzepte [4]. Eine kosten- und effizienzgetriebene Systemauslegung wurde zusätzlich am E-Bike-Beispiel adressiert [5].

C. Serienfahrzeug-Integration (Model Y) und Kostenbetrachtung

Das Model-Y-Paper ist in *eTransportation* veröffentlicht und bildet einen zentralen Baustein der Serienfahrzeug-Integration [6]. Ergänzend wurde eine TCO- und External-Cost-Bewertung verfügbarer Fahrzeuge in Deutschland publiziert [7].

IV. Ausblick

Kurzfristig steht die Fortführung des Zelleingangstests bis zur vollständigen Stichprobe im Vordergrund, inklusive konsolidierter Auswertung der Messgrößen und deren Zusammenhänge. Auf Systemebene folgt die Skalierung der V3-Inbetriebnahme mit REV2.1-Hardware sowie die weitere Konsolidierung der Integrationskette (Prüfstand/Fahrzeug) und der datenbasierten Diagnosefähigkeit.

Literaturverzeichnis

[1] S. Pohlmann, A. Mashayekh, J. Buberger, J. Estaller, A. Wiedenmann, M. Kuder, A. Neve, and T. Weyh, "Correlation analysis and feature extraction using impedance spectroscopy over aging of lithium ion batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 105, p. 114715, 01 2025.

[2] S. Pohlmann, A. Wiedenmann, D. Karnehm, M. Kuder, A. Neve, and T. Weyh, "Automated machine learning for estimating the state of health of lithium ion batteries," 06 2025, pp. 1–5.

[3] T. Högerl, J. Estaller, J. Buberger, W. Grupp, A. Wiedenmann, N. Sorokina, W. Bliemetsrieder, S. Pohlmann, C. Rothmund, M. Kuder, and T. Weyh, "Comparative loss analysis of an axial-flux pmsm fed by a modular multilevel inverter (bm3) versus a two-level inverter (svpwm)," 06 2025.

[4] N. Sorokina, D. Karnehm, W. Bliemetsrieder, A. Wiedenmann, T. Weyh, and M. Kuder, "Simulation and experimental validation of cross-switched reconfigurable battery," 06 2025, pp. 1–6.

[5] J. Estaller, N. Sorokina, W. Grupp, J. Buberger, T. Högerl, A. Wiedenmann, S. Pohlmann, M. Kuder, and T. Weyh, "Cost and efficiency optimization for a reconfigurable e-bike battery system," 06 2025.

[6] A. Wiedenmann, J. Estaller, J. Buberger, W. Grupp, M. Kuder, A. Neve, and T. Weyh, "A reconfigurable battery system for a tesla model y: Package and efficiency analysis," *eTransportation*, vol. 26, 08 2025.

[7] J. Buberger, J. Estaller, A. Wiedenmann, T. Högerl, W. Grupp, T. Weyh, and M. Kuder, "Total cost of ownership and external cost assessment of commercially available vehicles in germany," *Sustainability*, vol. 18, p. 170, 12 2025.

***Kurzbiographie Autor*— Andreas Wiedenmann schloss 2020 sein Masterstudium des Maschinenbaus an der Technischen Universität München ab. Während seines Studiums erwarb er ein breites Spektrum an Wissen und Erfahrung durch die Arbeit an hocheffizienten Prototypen und die Teilnahme an mehreren internationalen Teamwettbewerben. Während seines Masterstudiums begann er mit dem Bau seines eigenen Elektroautos (basierend auf einem Audi A2), einschließlich CAD-, PCB- und Softwaredesign sowie der Montage von Motor, Batterien und Verkabelung. Derzeit promoviert er an der Universität der Bundeswehr München, Deutschland.**

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

CHANCEN & AUSWIRKUNGEN

Prof. Dr. rer. nat. Thomas W. Adam

Dr. Gary Sean Cooney Ph.D., M.Sc., M.Sc., B.A. (mod.), (author).

Automated SEM-EDX imaging for source apportionment of tire- and brake-wear particles using dynamometer generated particles

I. Research Focus

Since beginning at Universität der Bundeswehr München in May 2025, I have been developing new technical solutions in the field of spectral analysis and characterization of brake dust and tire abrasion as part of the dtec.bw project MORE.

My research tasks include the planning, organisation, and implementation of research on the topic of aerosol measurements on a test bench for the generation of brake dust and tire abrasion using scanning electron microscopy coupled with energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX) with routine imaging methods and automated imaging. The sophisticated data generated requires evaluation using chemometric methods tailored to the dataset. Further development of complex measurement technology, organisation and implementation of measurement campaigns on the test bench and in the field in collaboration with manufacturers and project staff is also demanded. Additional tasks within the frame of employment include support in teaching courses (internships, research projects, theses) and representation of the working group in the scientific environment (publications, presentations, conferences).

Automated SEM-EDX allows the user to scan a sample area, identify and discriminate particles from the background, acquire single-particle spectra per identified particle, and extract morphological and chemical descriptors in a high-throughput manner. Recent studies in the field have applied this method for ambient dust and non-exhaust traffic emissions, utilising >100,000 environmental particles that improve the separation of tire-wear particles from other geogenic particles [1]. Building on our group's previous work on automated imaging applied to subway brake-wear particles [2], and utilising our test bench for brake-wear measurements [3] and tire-wear measurements, we aim to use automated SEM-EDX imaging for the source apportionment of tire- and brake-wear particles in real-world ambient samples.

The research focus can be broken down into several achievable goals: 1) Optimisation of SEM-EDX suitable substrate for active sampling of tire- and brake-wear, 2) Optimisation of measurement conditions for dynamometer and ambient sampling on said substrates, 3) Development of automated imaging workflow using AZtec Features software, 4) Building classification system using chemometric methods.

II. Procedure

The initial onboarding period (May – ca. August 2025) consisted of extensive literature review to familiarise myself with the research field of analytical/environmental chemistry of vehicle emissions. Additionally, I honed my skills in SEM imaging using the Zeiss Gemini3 SEM, ZEISS SmartSEM software, and EDX spectroscopy using the AZtec software from Oxford Instruments. I used probes from previous measurement campaigns, specifically the subway and dyno brake-wear [2,3], to become an expert in their analysis. I also familiarised myself with the Casino Monte-Carlo modelling software to be able to simulate the interaction of the SEM electron beam with particles of various sizes and material compositions.

This period also saw an introduction to the operation of the brake/tyre dynamometer including filter sampling procedures, and particle number and mass instrumentation. The initial tests of the converted dynamometer for tire-wear measurements allowed for the first tests of SEM-EDX suitable substrates and optimised flow rates for active sampling of particles. The previously used passive sampling methods of silicon wafers or niobium disks adhered to quartz fibre or polycarbonate (PC) filters enabled the testing of the image contrast while using the SEM variable-pressure back-scattering detector (VP-BSD) versus more conventional detectors i.e. secondary electron (SE2) detector. Meanwhile, a simple personal pump with 47mm filter holder was used to collect balcony ambient samples and test PC filter coating materials such as Au, Au/Pd, and Pt/Pd and resulting compare low-weight element contrast under the SEM.

A brake-wear measurement campaign in the first week of August 2025 saw the comparison of carbon-coated and Pt/Pd coated PC filters under different flow conditions, and the collected particles were examined under SEM-EDX and compared with results obtained from a single-particle mass spectrometer (SPMS) which were compiled into a publication that was submitted to Science of the Total Environment the 30th October 2025.

On the 14th November 2025, the new AZtec Features software was installed along with accompanying hardware. This program enables the development of automated imaging workflows for SEM-EDX imaging. After an introductory training in the software, several brake- and tire-wear samples were used to explore the capability of automated imaging for our desired goal. During this period a low-volume sampler (SEQ47/50-RV CD) was tested for ambient sampling in a remote location (Teststrecke, UniBw Neubiberg), optimising load based on sampling flow and sampling time. For future comparison studies of tire and brake wear, an identical sampler has been set-up next to the Autobahn A8.

III. Results 2025

In a short space of time, I have integrated into Prof. Adam's group as a specialist in aerosol particle analysis using SEM-EDX and have contributed to various projects within the group. Through literature analysis and discussion with colleagues I have a grounded understanding of the research field and the current state-of-the-art.

Passive sampling of tire-/brake-wear using silicon wafers has the benefit of an ultra-flat surface which is ideal for particle discrimination using SEM-EDX. However, silicon is an element of interest in the characterisation of emission particles and therefore not suitable as a substrate as the background EDX spectrum is indistinguishable from the particle spectra. Niobium disks have no spectral overlap but are rough on the microscale making particle identification difficult. Active sampling using filter membranes is desirable over passive sampling as the sampling rate is better controlled, it provides

more accurate and quantitative data on aerosol concentrations, particle sizes can be defined (e.g., PM2.5, PM10), and time-resolved data over different seasons or weather conditions can be obtained. Depth membranes such as quartz fibre filters or Teflon filters were deemed unsuitable for the purpose of SEM-EDX imaging due to their non-flat surface.

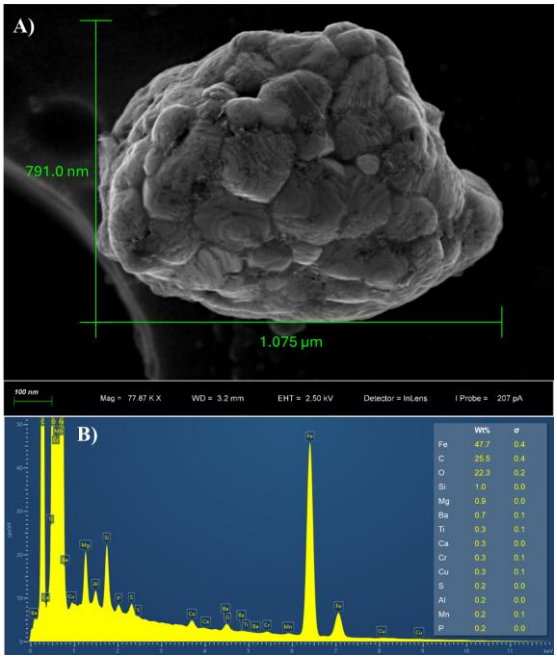


Figure 1: SEM-EDX data of brake-wear particle on PC membrane. A) SEM micrograph. B) EDX spectra with corresponding elemental composition.

Polycarbonate (PC) track-etched filter membranes have defined pore sizes and are ultra-flat. However, their drawbacks include large pressure drop and extensive charging under the SEM beam due to being non-conducting. The former issue is resolved by increasing pore size (2 µm diameter), and the latter is resolved by coating the substrate with a few nm of conductive material like Au, Au/Pd, Pt/Pd, or carbon. The choice of coating depends on the conductivity, stability under the electron beam, grain size, and EDX spectrum contribution. Au-coated PC filters have been selected as suitable substrates for active sampling and automated SEM-EDX imaging of brake- and tire-wear emissions, thus completing goal 1).

For ambient sampling using the low-volume sampler (SEQ47/50-RV, Sven Leckel) it was found that 24 hr sampling at 1 m^3 min^{-1} using the Au-coated PC filters is the maximum period to avoid overloading/ filter clogging. The initial brake wear samples from the dynamometer found that a sampling volume of 1.2 l min^{-1} achieved a uniform dispersion of particles on the PC filter. However, with scheduled improvements to the test bench to be implemented in January, this will have to be reevaluated and to optimise the load for tire wear measurements.

Ambient samples collected at the Teststrecke and Autobahn measurement stations are being used to optimise the grey-scale particle segmentation for the automated SEM-EDX imaging as these are the most complex samples expected in the study with geogenic, biological, tire, and brake wear combined. Subsets can be measured and validated to ensure robust particle recognition, with the morphological and chemical information being fed into a clustering algorithm to help identify potential classes. The previously developed classification system for subway brake particles [2] has been integrated as a basis for the brake wear classes.

IV. Outlook and Next Steps for 2026

The next year will see the upgrades to the dynamometer to include the ability to conduct simultaneous brake and tire measurements. Early January 2026 is planned to re-run previous brake and tire conditions to ensure its operation. Tests will follow into February on the combined functionality of simultaneous tire and brake measurements, with a comprehensive brake campaign (various brake discs and brake pads) to follow in March. By mid-May, it is envisioned to conduct a tire campaign with an asphalt-paved drum to better simulate the tire-on-road conditions. It is planned to sample extensively during these campaigns for building the classification system for the SEM-EDX automated imaging using controlled, “pure” samples. The optimisation of filter load will be conducted during the investigations of early January.

Simultaneously, ambient sampling at the Teststrecke and Autobahn stations will continue a one-week-per-month basis to build a year-long overview of tire and brake wear emissions. Using a classification system based on the dynamometer samples, it is envisioned that these ambient samples will be able to be routinely analysed in an automated manner.

Securing of funding is paramount for the continuation of this research project and therefore research proposals are planned for submission by 16th January 2026 (Tire Industry Project) and latest 1st May 2026 (DFG). Planned conferences to attend include the Tyre Emissions & Sustainability Europe Conference, taking place 7–8 July 2026 in Berlin, Germany.

V. Bibliography

[1] Rausch, J., Jaramillo-Vogel, D., Perseguers, S., Schnidrig, N., Grobéty, B., & Yajan, P., “Automated identification and quantification of tire wear particles (TWP) in airborne dust: SEM/EDX single particle analysis coupled to a machine learning classifier”, *Science of the Total Environment*, vol. 803, p. 149832, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149832.

[2] Neukirchen, C., Meiners, T., Bendl, J., Zimmermann, R., & Adam, T., "Automated SEM/EDX imaging for the in-depth characterization of non-exhaust traffic emission from the Munich subway system", *Science of the Total Environment,* vol. 915, p. 170008, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170008

[3] Neukirchen, C., Saraji-Bozorgzad, M. R., Mader, M., Mudan, A. P., Czasch, P., Becker, J., Di Bucchianico, S., Trapp, C., Zimmermann, R., & Adam, T., "Comprehensive elemental and physical characterisation of vechicle brake wear emissions from two different brake pads following the Global Technical Regulation methodology", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 482, p. 136609, 2025, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.136609

***Author Biography* — Dr. Gary Sean Cooney holds a Ph.D. in Physical Chemistry from the University of Bordeaux, Bordeaux, France and as of May 2025, is employed as a post-doctoral research associate as part of Prof. Adam’s group at the Institute for Chemistry and Environmental Engineering. Dr. Cooney is developing new technical solutions in the field of spectroscopic analysis and characterisation of brake dust and tire abrasion as part of the dtec.bw project MORE.**

Methodenentwicklung zur Bestimmung organischer Reifenmarker und Transformationsprodukte in Reifen- und Straßenabriebpartikeln

Elisabeth Eckenberger

I. Forschungsschwerpunkt

Mikro- und Nanoplastik werden inzwischen in Luft, Gewässern und Böden nachgewiesen und gelten auch aufgrund ihrer atmosphärischen Verfrachtung in entlegene Regionen als relevantes Umweltproblem [1], [2]. Unter den Quellen gewinnen Reifen- und Straßenabriebpartikel (engl. Tire and Road Wear Particles (TRWP)) zunehmend an Bedeutung, da sie einen wesentlichen Anteil nicht-abgasbedingter Partikelemissionen darstellen und gleichzeitig eine komplexe Matrix aus Elastomer, Straßenstaub und Additiven bilden [3], [4].

Trotz wachsender Datenlage bleibt die robuste, routinetaugliche und quellspezifische Quantifizierung von TRWP in Umweltmatrizes schwierig, da TRWP in realen Proben stark verdünnt vorliegen und ihre Identifikation häufig auf indirekten Markersubstanzen beruht [4]. Ein vielversprechender, aber analytisch anspruchsvoller Ansatz ist die Nutzung organischer Reifenadditive und ihrer Transformationsprodukte als komplementäre Marker. Dazu zählen u. a. p-Phenylendiamine (PPDs) und Quinone, Guanidine, Benzothiazole sowie Melamin-basierte Vernetzer. Diese Stoffgruppen werden zunehmend in Umweltproben detektiert und sind gleichzeitig relevant für Quellenzuordnung und Expositionsabschätzung [5], [6], [7], [8].

Der Forschungsschwerpunkt liegt auf der Entwicklung und Optimierung chemisch-analytischer Verfahren, um organische Reifenmarker und deren Transformationsprodukte mit hoher Sensitivität und Selektivität in labor-generiertem Reifenabrieb nachzuweisen. Dazu werden TRWP auf einem Dynamometer-Prüfstand unter definierten Abriebbedingungen (u. a. Reifentyp und -hersteller, Fahrprofil, Temperatur) erzeugt. Der wesentliche Vorteil dieses Ansatzes ist die reproduzierbare Erzeugung reifenbasierter Emissionen ohne die Variabilität realer Umweltmatrizes. Ziel ist es, systematische Zusammenhänge zwischen Reifenparametern, Abriebsbedingungen und der resultierenden chemischen Signatur herauszuarbeiten, um damit eine belastbare Grundlage für Umwelt- und Expositionsbewertungen zu schaffen.

II. Vorgehensweise

Die Arbeiten basieren auf einer systematischen Testmatrix mit mehreren Reifen der Kategorien Sommer, Winter und Ganzjahresreifen unterschiedlicher Hersteller sowie variierten Fahr- und Temperaturbedingungen. Die Versuchsdurchführung erfolgt in enger Abstimmung mit dem Prüfstands- und Laborbetrieb, um reproduzierbare Messfenster und stabile Betriebsbedingungen sicherzustellen.

Chemisch-analytisch steht die Entwicklung eines robusten und reproduzierbaren Workflows im Vordergrund: (i) artefaktminimierte, filterbasierte Probennahme von TRWP, (ii) Optimierung der Flüssigextraktion als Kompromiss zwischen hoher Wiederfindung und minimalen Verlusten sowie (iii) Entwicklung und Validierung sensitiver Methoden der Hochleistungsflüssigkeitschromatographie gekoppelt mit Tandem-Massenspektrometrie (HPLC–MS/MS) zur quantitativen Bestimmung sehr geringer absoluter Massen. Dies ist erforderlich, da organische Additive typischerweise nur wenige Prozent der Reifenformulierung ausmachen und in TRWP-Proben entsprechend im Spurenbereich vorliegen.

Im Rahmen der HPLC-Separation erfolgt eine zielgerichtete Optimierung der mobilen Phase, des Gradients und der Säule, um einerseits die chromatographische Stabilität der zentralen Markerauswahl zu gewährleisten und andererseits Matrixeffekte zu minimieren. Auf MS/MS-Ebene werden Quantifier-/Qualifier-Übergänge sowie gerätespezifische Parameter (z. B. Kollisionsenergien, Verweilzeiten) so eingestellt, dass die Methode zugleich sensitiv, selektiv und reproduzierbar ist. Für die Quantifizierung wird ein dynamic-MRM (dMRM)-Ansatz verwendet, bei dem die einzelnen MS/MS-Übergänge nur in den erwarteten Retentionszeitfenstern gemessen werden. Dadurch steht pro Signal mehr Messzeit zur Verfügung, was die Empfindlichkeit und die Datenqualität bei Mehrstoffmethoden verbessert.

III. Ergebnisse 2025

Im Jahr 2025 wurde der Probenaufarbeitungs-Workflow optimiert. Die Wahl fiel auf eine milde Extraktionsstrategie (Methanol-basierte Extraktion, Schütteln), da eine intensive Ultraschallbehandlung bei quarzfaserbasierten Filtern das Risiko reaktiver Nebenprozesse und damit potenzieller Artefakte in der Markerzusammensetzung erhöhen kann [9]. Unter den gewählten Bedingungen liegen die Wiederfindungsraten der Zielsubstanzen im Bereich von 73–112 % (substanzabhängig) und erfüllen damit die Anforderungen für quantitative Auswertungen im Spurenbereich.

Für die chromatographische Trennung wurde eine reversed-phase C18-Säule mit einem Methanol/Wasser-Gradienten als Basis etabliert. Aufgrund unterschiedlicher Polaritäten und Transformationsprodukte wurden zwei analytische Methoden entwickelt und eingesetzt: (1) eine Methode für PPDs und relevante Transformationsprodukte (inkl. quinonoider Produkte) sowie (2) eine Methode für Guanidine und Benzothiazol-/Thiazol-Derivate als wichtige vulkanisations- und alterungsbezogene Marker. Durch die Aufteilung auf zwei Methoden werden die Trennleistung und Signalstabilität verbessert (z. B. Peakformen, Retention, Ionisierung) und es müssen weniger Kompromisse eingegangen werden, die bei sehr unterschiedlichen Stoffklassen sonst die Gesamtmethode verschlechtern würden.

IV. AUSBLICK UND NÄCHSTE SCHRITTE FÜR 2026

Die generierten TRWP-Proben werden anhand der etablierten chemischen Methoden sequenziell analysiert und quantifiziert. Der Fokus liegt auf der Verknüpfung der chemischen Markerprofile mit physikalischen Kenngrößen (z. B. Partikelanzahlkonzentration, Größenverteilungen, Gesamtpartikelanzahl) sowie den jeweiligen Abriebs- und Betriebsbedingungen. Ziel ist es, mechanistische Trends, wie z. B. reifentyp- oder temperaturabhängige Verschiebungen in der Markerkomposition, belastbar abzuleiten.

Darüber hinaus werden Untersuchungen zur Gas-Partikel-Partitionierung ökotoxikologisch relevanter Reifeninhaltsstoffe vorbereitet, um besser zu verstehen, unter welchen Bedingungen volatile Komponenten aus der Partikelmatrix freigesetzt werden. Damit soll auch geklärt werden, welche Bedeutung diese Prozesse für die Exposition und die mögliche Bildung sehr kleiner Partikel bis hin zu Nanofraktionen haben. Perspektivisch tragen die Ergebnisse dazu bei, markerbasierte TRWP-Nachweise in Umweltmatrizes methodisch zu stärken und bestehende Lücken in Quellenzuordnung und Expositionsabschätzung zu schließen.

V. LITERATURVERZEICHNIS

[1] I. Goßmann *et al.*, "Occurrence and backtracking of microplastic mass loads including tire wear particles in northern Atlantic air," *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, p. 3707, Jun. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-39340-5.

[2] S. Allen *et al.*, "Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment," *Nat. Geosci.*, vol. 12, no. 5, pp. 339–344, May 2019, doi: 10.1038/s41561-019-0335-5.

[3] P. J. Kole, A. J. Löhr, F. Van Belleghem, and A. Ragas, "Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 14, no. 10, p. 1265, Oct. 2017, doi: 10.3390/ijerph14101265.

[4] B. Baensch-Baltruschat, B. Kocher, F. Stock, and G. Reifferscheid, "Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment," *Science of The Total Environment*, vol. 733, p. 137823, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137823.

[5] P. Klöckner, B. Seiwert, S. Wagner, and T. Reemtsma, "Organic Markers of Tire and Road Wear Particles in Sediments and Soils: Transformation Products of Major Antiozonants as Promising Candidates," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 17, pp. 11723–11732, Sep. 2021, doi: 10.1021/acs.est.1c02723.

[6] S. Weyrauch, B. Seiwert, M. Voll, S. Wagner, and T. Reemtsma, "Accelerated aging of tire and road wear particles by elevated temperature, artificial sunlight and mechanical stress — A laboratory study on particle properties, extractables and leachables," *Science of The Total Environment*, vol. 904, p. 166679, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.166679.

[7] B. Seiwert, M. Nihemaiti, M. Troussier, S. Weyrauch, and T. Reemtsma, "Abiotic oxidative transformation of 6-PPD and 6-PPD quinone from tires and occurrence of their products in snow from urban roads and in municipal wastewater," *Water Res.*, vol. 212, p. 118122, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.118122.

[8] Z. Tian *et al.*, "A ubiquitous tire rubber–derived chemical induces acute mortality in coho salmon," *Science (1979).*, vol. 371, no. 6525, pp. 185–189, Jan. 2021, doi: 10.1126/science.abd6951.

[9] B. Miljevic, F. Hedayat, S. Stevanovic, K. E. Fairfull-Smith, S. E. Bottle, and Z. D. Ristovski, "To Sonicate or Not to Sonicate PM Filters: Reactive Oxygen Species Generation Upon Ultrasonic Irradiation," *Aerosol Science and Technology*, vol. 48, no. 12, pp. 1276–1284, Dec. 2014, doi: 10.1080/02786826.2014.981330.

***Kurzbiographie Autorin* — Die Autorin hat einen B.Sc. und M.Sc. in Chemie und war von 2021–2024 in der Atmosphärenchemie-Gruppe der Universität Bayreuth tätig. Ihr Profil verbindet artefaktbewusste Aerosolprobenahme mit molekularer chemischer Fingerprint-Analytik ultrafeiner Partikel (UFP) und TRWP-relevanter organischer Markersubstanzen. Als Erstautorin hat sie multi-klassige organische Markerprofile in niedrig-massigen UFP-Proben aus Labor- und Umweltstudien mittels Flüssigextraktion und HPLC-Analytik quantifiziert. Zudem hat sie zentrale Unsicherheiten der Aerosolprobenahme (z. B. größenabhängige Verluste, Cut-off-Verhalten sowie druck- und handhabungsbedingte Artefakte) systematisch untersucht und minimiert. Der aktuelle Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung sensitiver HPLC–MS/MS-Methoden zur quantitativen Bestimmung organischer Reifenadditive und ihrer Transformationsprodukte in TRWP.**

Entwicklung und Aufbau eines Prüfstands zur Messung von Bremsen- und Reifenabrieb

Carsten Neukirchen (Autor).

I. Forschungsschwerpunkt

Carsten Neukirchen ist am Institut für Chemie und Umwelttechnik von Prof. Adam tätig und untersucht hier im Rahmen des MORE Projekts, im Teilgebiet Chancen und Auswirkungen, verkehrsbedingte nicht-Verbrennungspartikel. Zudem übernimmt er die messtechnische Betreuung in der Entwicklung eines innovativen Bremsen- und Reifenprüfstandes, welcher in Zusammenarbeit mit dem Institut von Prof. Trapp und diversen Industriepartnern entwickelt wird.

Im Fokus der Analysen steht hierbei die chemische Untersuchung auf spezielle organische Markersubstanzen und Schadstoffen, sowie Schwermetalle, mittels Massenspektrometrie und Elektronenrastermikroskopie mit energiedispersiver Röntgenanalyse. Des Weiteren werden physikalische Messungen bezüglich Partikelkonzentrationen und Größe der entstehenden Partikel durchgeführt um einen umfassenden Überblick über die erzeugten Partikel zu gewinnen.

II. Vorgehensweise

Um zu ermitteln welchen Einfluss verschiedene Reifentypen, sowie die Umgebungstemperatur, auf die entstehenden Emissionen haben wurde eine zwei monatige Messkampagne mit einem individuellen Prüfzyklus durchgeführt. Hierbei wurde die Anzahl, Masse, sowie Größenverteilung der entstehenden Partikel untersucht, sowie Filterproben auf Reifenadditive analysiert. Als Prüflinge wurden je ein Sommerreifen, ein Winterreifen und ein Allwetterreifen verwendet, welche bei 12 °C und 23 °C Prüfstandstemperatur gemessen wurden.

III. Ergebnisse 2025

Im Rahmen einer zwei monatigen Messkampagne wurden erste Daten zu emittierten Reifenpartikeln gesammelt, welche unter anderem die Präsenz von Nanopartikeln unter bestimmten Prüfstandsbedingungen zeigten. Dies ist eine wesentliche Erkenntnis und bislang unzureichend in der Fachliteratur dokumentiert. Die Größe der Partikel, von unter 10 nm, legt eine Kondensation aus der Gasphase nahe. Dies könnte einerseits durch eine thermische Dekomposition der polymeren Bestandteile des Reifens, oder andererseits, durch das Ausdampfen von Additiven zu begründen sein. Abbildung 1 zeigt die durchschnittliche Größenverteilung des untersuchten Allwetterreifens, gemessen mit einem DMS500.

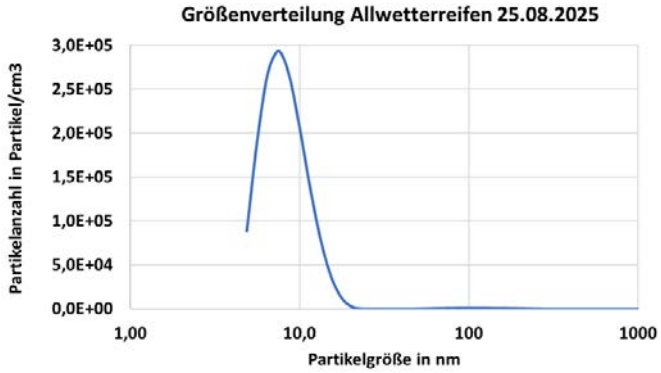


Abbildung 1: Durchschnittliche Größenverteilung der Partikel eines Allwetterreifens gemessen mit einem DMS500

IV. Ausblick und nächste Schritte für 2026

Anfang 2026 soll zunächst eine Testreihe gefahren werden, bei der sowohl Reifen, als auch Bremsen simultan auf ihre Emissionen getestet werden sollen. Dies soll eine bessere Vergleichbarkeit der beiden Quellen unter identischen Bedingungen ermöglichen. Zudem wird 2026 ein Fokus auf die Aufklärung des Bildungsmechanismus von Nanopartikeln aus Reifenabrieb gelegt. Hierzu werden zeitnah erste Versuche unter Laborbedingungen beginnen, bei denen das Verhalten von Reifen unter erhöhten Temperaturen mittels thermogravimetrischer Analyse untersucht wird.

***Kurzbiographie Autor* — Carsten Neukirchen absolvierte 2018 seinen Bachelor of Science in Chemie an der FH Aachen und seine Master of Science in bioanalytischer Chemie und pharmazeutischer Analytik an der Hochschule Fresenius im Jahr 2020. Von April 2021 bis Januar 2025 promovierte er an der Universität Rostock und erlangte den Titel Dr. rer. nat.**

Seit April 2021 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Chemie & Umwelttechnik beschäftigt sich mit der chemisch- physikalischen Charakterisierung von Bremsen- und Reifenabrieb.

FORSCHUNGSBERICHTE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITENDEN

CHANCEN & AUSWIRKUNGEN

Prof. Dr. rer. pol. Axel Schaffer

Regional scenario based prognosis of vehicle fleets, traffic and local emissions

Dr. Sebastian Brun

I. Research Focus

The current research focuses on developing scenario-based prognoses of battery electric vehicle (BEV) adoption at the regional level. The work follows two complementary methodological approaches.

First, we collaborate with the project partner M-Five to apply their market-based vehicle fleet and traffic model, which provides scenario-dependent forecasts of vehicle stocks and traffic demand. This model serves as the backbone for forward-looking projections under alternative policy and market assumptions.

Second, we conduct empirical regional analyses of BEV adoption in Germany to identify key drivers and barriers. These studies are intended to (i) validate assumptions embedded in the scenario model and (ii) provide region-specific insights that are not captured by national-level projections.

A further central objective is the regionalisation of the ASTRA system dynamics model, again in cooperation with M-Five. This step is required to move from national averages to spatially differentiated projections of traffic activity and emissions. A particular focus lies on non-exhaust emissions, especially brake wear emissions. For this purpose, we collaborate with Prof. Adams' research group, which provides empirical data and domain expertise necessary to integrate brake dust emissions into the traffic projections generated by ASTRA.

II. Methodological Approach

To analyse regional drivers of BEV adoption, we estimated econometric models using data at the NUTS-3 level for Germany. The dependent variable is the number of BEVs per 1,000 inhabitants. Explanatory variables include indicators of charging infrastructure availability, housing structure, motorisation levels, public transport accessibility, climatic conditions, degree of urbanisation, and a regional dummy distinguishing East and West Germany. Socio-economic variables, such as household income, are included as controls. Data are primarily drawn from the Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) [1] and complementary regional datasets.

The scenario work with M-Five builds directly on earlier activities within the MORE project. Existing scenarios were reviewed and adjusted to reflect updated boundary conditions and research objectives.

The main methodological effort currently lies in adapting the ASTRA system dynamics model from a national to a regional scale. This involves restructuring the model logic, preparing region-specific input data for initialization and calibration, and developing auxiliary data-processing tools. At present, a proof-of-concept regional module for population dynamics has been successfully implemented. Further modules are under development.

Work on brake dust emissions focuses on integrating empirical emission factors into the traffic projections. Initial parameter values for internal combustion engine vehicles (ICEVs) have been provided by Dr. Carten Neukirchen (Prof. Adams' group). The extension to BEVs and the interaction with regenerative braking will be addressed once the regional traffic projections are fully operational.

III. Results 2025

We conducted an econometric analysis of BEV adoption across approximately 400 rural and urban NUTS-3 regions in Germany.

The results indicate that public charging infrastructure, the share of single-family housing, the level of motorisation, and location in West Germany are positively associated with private BEV adoption. In contrast, a higher degree of urbanisation is associated with lower private BEV ownership rates. A spatial inspection of the results suggests that rural regions adjacent to urban centres exhibit particularly high adoption levels, pointing to commuter-driven BEV uptake.

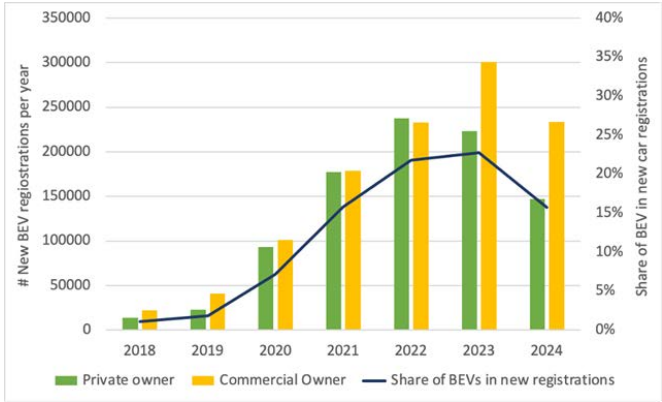


Figure 1: BEV adoptions per year, Source: Own illustration based on data from KBA [1]

For commercial BEVs, the results differ. While charging infrastructure and motorisation levels remain significant, most housing-related and urbanisation variables lose explanatory power. Instead, the number of cold days shows a statistically significant negative effect, consistent with concerns about battery performance and operational reliability under low-temperature conditions. Overall, these findings align well with

the differing usage patterns and decision criteria of private households versus commercial fleet operators.

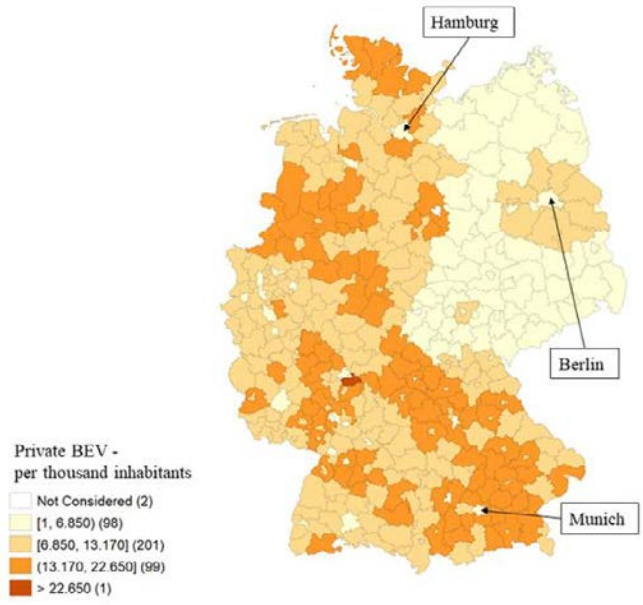


Figure 2: Private BEV per 1000 inhabitants, Source: Own illustration based on data from KBA [1]

In cooperation with M-Five, scenario definitions were refined and aligned with the requirements of regional modelling. Substantial progress was achieved in designing a workflow that enables ASTRA to operate on a regional level. Input data for initialization and calibration have been prepared, and a structured process for model adaptation has been established.

At present, a functioning regional population module exists as a proof of concept. The remaining modules are planned to be structurally adapted by the end of January. February is reserved for calibration, plausibility checks, and systematic error analysis.

IV. Outlook and Next Steps for 2026

The primary objective for the next phase is to complete the regionalised ASTRA model, enabling spatially explicit projections of traffic-related emissions. This is a prerequisite for quantifying regional brake dust emissions, which are expected to decline with increasing BEV penetration but will not be fully eliminated.

Beyond brake wear, the regional ASTRA framework will allow the analysis of additional locally relevant emissions and mobility-related externalities. This will make it possible to compare local versus aggregate impacts of alternative mobility scenarios and to identify regions of particular relevance—whether due to structural characteristics (e.g. urban versus rural) or geographic location.

At present, detailed projections of brake dust emissions remain contingent on the completion and validation of the regional traffic forecasts. Once this foundation is in place, emission modelling will be extended accordingly.

V. References

[1] Kraffahrtsbundesamt, Flensburg: kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen

Kurzbiographie Autor —
Dr. Sebastian Brun, geb. 1981,
Detec Projekt Unibw: 2021 – current
Berater bei der Unternehmensberatung Bazan, Witten 2019-2021
Unabhängiger Forscher 2018 - 2019
Promoviert Unib 2018 Dr rer. Pol.,
Wissenschaftlicher Mitarbeiter Unibw Professur für Wandel und Nachhaltigkeit 2012 - 2018
Dipl. Volkswirt 2011, VWL
Studium der Volkswirtschaftlehre, Uni Bonn 2005 - 2011

VERÖFFENTLICHUNGEN

Abo-Amsha K., Zivkovic D., Hasslberger J., Klein M.; Numerical simulation of water in fuel emulsion jet; 15th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling; 2025.

Adam T. et al.; Advanced Mobility Research at the Institute for Chemistry and Environmental Engineering at the Bundeswehr University Munich; Korea-EU Horizon Europe Researchers Networking Forum on Advanced Mobility (Brüssel, 2025); 2025.

Arslan O., Hoffmann S.; An Approach to Formulate the Dial-a-Ride Problem with Linear Programming; 11th IEEE International Smart Cities Conference; 2025.

Arslan O., Hoffmann S.; Integration of On-Demand Ride-Pooling into a Microscopic Traffic Flow Simulation Environment; VEHITS 2025 - 11th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems; 2025.

Backhaus A., Lüttel T., Mählisch M.; Knowledge Distillation for Semantic Segmentation: A Label Space Unification Approach; The 2025 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2025); 2025.

Beer L., Bienemann A., Luettel T., Maehlisch M.; Eine wahrnehmungsbasierte Architektur für den Auto-nomen Konvoi; Tagungsband DWT-SGW Forum Unmanned Systems X; 2025.

Beer L., Luettel T., Maehlisch M.; Towards Feature-Based Low-Latency Localization with Rotating Li-DARs; IEEE Journal of Indoor and Seamless Positioning and Navigation (J-ISPIN); 2025. DOI: 10.1109/JISPIN.2025.3562512.

Bienemann A., Beer L., Reich A., Steinecker T., Backhaus A., Forkel B., Berthold P., González J. D., Mortimer P., Luettel T., Maehlisch M.; A Perception-Based Architecture for Autonomous Convoying in GNSS-Denied Areas; IEEE Transactions on Field Robotics (T-FR) ; 2025. DOI: https://doi.org/10.1109/TFR.2025.3600195.

Bienemann A., Mortimer P., Luettel T., Maehlisch M.; Surface-Aware Lane Departure for Obstacle Avoidance in Off-Road Environments using Semantic Segmentation and MPC; 28th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC); 2025.

Binder C.; Erfordernis eines Flächenkompensationsmodells zur Erreichung des Flächenschutzziels, Netto-Null-Flächenverbrauch; Raumplanung und Raumordnung (RuR), Band 83, Nr. 4, S. 249-255; 2025. DOI: https://doi.org/10.14512/rur.3081.

Binder C.; Erfordernis eines Flächenkompensationsmodells zur Erreichung des Flächensparziels “Netto-Null-Flächenverbrauch; REAL CORP 2025, S. 403-413; 2025. DOI: 10.48494/REALCORP2025.9053.

Brun S., Lohwasser J., Schaffer A.; BEV adoption in Germany - Regional analysis of attitudinal, socio-economic and contextual factors; Transport Policy; 2025.

Chakraborty N., Klein M.; On the Interrelation of the Fractal Description and the Ratio of the 3D and 2D Flame Wrinkling for Turbulent Premixed Flames; Flow Turbulence and Combustion; 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10494-025-00670-7.

Emam M., Gerdts M.; Safety-oriented Dynamic Path Planning for Automated Vehicles; IEEE VTC 2025 Spring; 2025. DOI: https://ieeexplore.ieee.org/document/11174939.

Estaller J., Sorokina N., Grupp W., Buberger J., Högerl T., Wiedenmann A., Pohlmann S., Kuder M., Weyh T.; Cost and Efficiency Optimization for a Reconfigurable E-Bike Battery System; The 26th European Conference on Power Electronics and Applications; 2025.

Folcarelli L., Concetti R., Cozzi F., Ferrero A., Masseni F., Pastrone D., Hasslberger J.; A Chemical Reactor Network Methodology for Estimating NOx Emissions under; International Journal of Hydrogen Energy; 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150561

Forkel B., Berthold P., Maehlisch M.; An Extrinsic Sensor Calibration Framework for Precise Probabilistic Joint Calibration of Camera, LiDAR, and Radar; 28th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC); 2025.

Gallus L., Högerl T., Thomas W., Pfisterer H.-J.; A Review of Inverter Induced Losses in Electrical Machines; VDE Antriebssysteme, VDE Verlag GmbH; 2025. Print ISBN:978-3-8007-6612-3

Gross C., Grundl L., Trapp C., Sander P.; Enhancing University Research Project Efficiency through the Application of a Risk-Based Methodology; IJARME; 2025. DOI: https://doi.org/10.33422/ijarme.v8i3.1578.

Gross C., Grundl L., Trapp C., Sander P.; Hypothesis-driven Risk Management: An Approach to Enhancing Efficiency in University Research Projects; 6th South American Conference on Industrial Engineering and Operations Management; 2025. DOI: 10.46254/SA6.20250013.

Gross C., Grundl L., Trapp C., Sander P.; Integration of a Risk-Based Approach for the Validation of a Simulation-Supported Combustion Process as Part of a University Research Project; 8th International Conference on Business, Management and Finance at the University of Oxford; 2025.

Gross C., Grundl L., Wolf G., Zimmermann C., Trapp C., Sander P.; Efficient Collaboration between Industry and Universities: Opportunities, Challenges, and an Integrative Project Plan; 21. Internationalen Probabilistic Workshop (IPW 2025); 2025. DOI: 10.1002/cepa.3329

Gross C., Trapp C., Sander P.; Improving Risk Management in University Research: Identifying Critical Risks with a Digital Twin Approach; 6th South American Conference on Industrial Engineering and Operations Management; 2025. DOI: 10.46254/SA6.20250016

Herbert M., Chaib O., Boxx I., Hochgreb S., Chakraborty N., Klein M.; Lewis number effects on weakly turbulent premixed bunsen flames: A comparison; Proceedings of the Combustion Institute; 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proci.2025.105970.

Herbert M., Chaib O., Boxx I., Hochgreb S., Chakraborty N.; Lewis number effects on weakly turbulent premixed bunsen flames: A comparison; 13th Mediterranean Combustion Symposium, Corfu, Greece; 2025.

Högerl T., Estaller J., Buberger J., Grupp W., Wiedenmann A., Sorokina N., Bliemetsrieder W., Pohl-mann S., Rothmund C., Kuder M., Weyh T.; Comparative Loss Analysis of an Axial-Flux PMSM Fed by a; The 26th European Conference on Power Electronics and Applications; 2025.
Holzmair M.; Advancing Urban Mobility Through Design Research: A Case Study on Applying Adaptive Curbside Management in a Space-Constrained Street Environment; IEEE Smart Cities Symposium Prague SCSP25; 2025.

Holzmair M.; Rethinking Urban Interventions and the Planning Process: The Role of Virtual Reality for the Transformation of Public Engagement; 10th International XR-Metaverse Conference - Maastricht – IAI-TI; 2025.

Holzmair M.; The Street on Demand: A revolution in Adaptive Urban Spaces and Dynamic Curbside Management; ITS Mobility Australia 2025; 2025.

Jeong S., Adam T. et al.; Aerosol Particle Classification using Single-Particle Mass Spectrometry and Deep Learning for the Detection of Ship Emissions; European Aerosol Conference (EAC) 31.08.-05.09. 2024, Lecce, Italien; 2025.

Jeong S., Adam T. et al.; Identification of Non-exhaust emission in laboratory and field measurements; European Aerosol Conference (EAC) 31.08.-05.09. 2024, Lecce, Italien; 2025.

Jeong S., Adam T. et al.; Physical and chemical characterization of brake and tyre wear measured on a custom-built combined dynamometer; European Aerosol Conference (EAC) 31.08.-05.09. 2024, Lecce, Italien; 2025.

Jeong S., Adam T.; Identification of Non-exhaust emission in laboratory and field measurements; 17th Europe-Korea Conference on Science and Technology (EKC), Wien; 2025.

Kamboj S., Vijay A., Trapp C., Gerling D.; Performance Analysis of a Five-Phase Self-Excited Synchronous Machine in a Wind Turbin; Energy Conversion Congress & Expo Europe (ECCE Europe); 2025.

Karnehm D., Estaller J., Kuder M., Neve A., Weyh T.; Performance Comparison of a Full-Bridge Based Reconfigurable and Conventional Battery Storage System; 34th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2025); 2025.

Karnehm D., Neve A.; Core Temperature Estimation of Lithium-Ion Batteries Using Physics Informed Neural Network and Kolmogorov-Arnold Network; IECON 2025 – 51th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society; 2025.

Karnehm D., Samanta A., Neve A., Williamson S.; Pioneering Cloud-enhanced Real-time Control of Modular-Multilevel Reconfigurable Battery Packs for Automotive Applications; 2025 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition – Asia; 2025. DOI: 10.1109/ECCE-Asia63110.2025.11112440.

Karnehm D., Samanta A., Rosenmüller C., Neve A., Williamson S.; Core Temperature Estimation of Lithi-um-Ion Batteries Using Long Short-Term Memory (LSTM) Network and Kolmogorov-Arnold Network (KAN); IEEE Transactions on Transportation Electrification; 2025. DOI: 10.1109/TTE.2025.3559633.

Karnehm D., Samanta A., Williamson S.; Application of Machine Learning, Internet of Things, and Digital Twin in Battery Storage; Battery Technologies for E-Mobility, Taylor & Francis, Vol. 1; 2025. DOI: 10.1201/9788743800712-7.

Karnehm D., Zheng Y., Neve A., Teodorescu R.; Temperature Distribution Estimation of Lithium-Ion Batteries with Parameter-embedded Neural Operators; AI in Science Summit 2025, Dänische EU-Präsidenschaft, Kopenhagen; 2025.

Kastl E. M., Bohmann S., Huemer A. K.; Perceived Mobility Need Satisfaction (PMNS) Scale: First Empirical Validation and Its Role in Predicting Transport Mode Usage and Willingness to Pay for Mobility Measures; 5. Kongress der Fachgruppe Verkehrspsychologie; 2025.

Leu S., de Almeida Correia G.H., van Lint H., Leonhardt A.; Understanding Car Usage Patterns for V2G Integration: Insights from Dutch Travel Diaries; VEHITS 2025 - 11th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems; 2025. DOI: 9789897587450.

Meda S., Ilic M., Niels T., Papapanagiotou E.; A simulator study on car user's perceptions interaction with autonomous shuttles; Proceedings of the 11th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems – VEHITS; 2025. DOI: http://doi.org/10.5220/0013272700003941.

Neukirchen C., Adam T. et al.; Physical and chemical characterization of brake and tyre wear measured on a custom-built combined dynamometer; 28th 2025ETH Nanoparticles Conference, June 16-19, 2025; 2025.

Neukirchen C., Saraji-Bozorgzad M., Mäder M., Mudan A., Czasch P., Becker J., Di Bucchianico S., Trapp C., Zimmermann R., Adam T.; Comprehensive elemental and physical characterization of vehicle brake wear emissions from two different brake pads following the Global Technical Regulation methodology; Journal of Hazardous Materials; 2025.

Pan J., Sotiriadis P., Nenchev V., Englberger F.; Improving Functional Reliability of Near-Field Monitoring for Emergency Braking in Autonomous Vehicles; The IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) ITSC 2025; 2025.

Papapanagiotou E., Hoffmann S.; Real-Time Traffic Data Fusion for Multimodal Intelligent Transportation Systems — A Real-World Laboratory in Munich Mobility Research Campus; 2025 9th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS); 2025. DOI: http://doi.org/10.1109/MT-ITS68460.2025.11223598

Pohlmann S., Mashayekh A., Buberger J., Estaller J., Wiedenmann A., Kuder M., Neve A., Weyh T.; Correlation analysis and feature extraction using impedance spectroscopy over aging of lithium ion batteries; Journal of Energy Storage; 2025.

Pohlmann S., Wiedenmann A., Karnehm D., Kuder M., Neve A., Weyh T.; Automated Machine Learning for Estimating; 2025 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo + Electric Aircraft Technologies Symposium; 2025. DOI: 10.1109/ITEC63604.2025.11098103

Rabl A., Rohkam M., Saraji-Bozorgzad M., Bendl J., Giocastro B., Cotenescu R., Burger V., Adam T., Hupfer A., Gümmer V.; Particulate and gaseous emissions of an Allison 250-C20B turboshaft engine using FT-SPK; 2025.

Rohkamp M., Adam T. et al.; Comparison of non-C02 Turboshaft Engine Emissions using Jet A-1, HEFA- and FT-SPK; 28th ETH Nano2025particles Conference, June 16-19, 2025; 2025.

Salem S., Leone P., Leonhardt A.; Real-Time Cyclist Prioritization with Fuzzy Logic-Based Signal Control; VEHITS ; 2025. DOI: 10.5220/0013292500003941 .

Samanta A., Karnehm D., Sharma M., Neve A., Williamson S.; Thermal Behavior Forecasting for Battery Management Systems Using iTransformer and Kolmogorov–Arnold Network; IECON 2025 – 51th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society; 2025.

Saraji-Bozorgzad M., Bendl J., Jeong S., Padoan S., Mudan A., Etzien U., Giocastro B., Schade J., Käfer U., Streibel T., Buchholz B., Zimmermann R., Adam T.; Influence of low and high sulphur marine engine fuels and wet scrubbing on heavy metal emissions from ships; Science of the Total Environment; 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180254.

Steinecker T., Luettel T., Maehlisch M.; Towards Safety-Aware AI Agents; FAS-Workshop 2025; 2025.

Tießler-Horvat M., Hoffmann S.; Using trajectory data from shared e-scooters to assess the local cycling infrastructure: Chances and limitations; Transportation Research Board 2025; 2025.

Trapp C.; Methodology for the Development of Passive Prechamber Spark Plugs for Use in Ultra-Lean Light-Duty Hydrogen Engines; SMTP25 - 20th Symposium on Sustainable Mobility, Transport and Power Generation. Graz-Österreich; 2025.

Vijay A., Thaler B., Köcheler V., Oppl T., Trapp C.; Cellular Energy Architecture to Secure Resilient Energy Supply for Critical Infrastructure; 2025 Sustainable Energy and Powertrains Conference; 2025.

Wiedenmann A., Estaller J., Buberger J., Grupp W., Kuder M., Neve A., Weyh T.; A Reconfigurable Battery System for a Tesla Model Y: Package and Efficiency Analysis; eTransportation; 2025.

Wolf G., Gross C., Trapp C., Zimmermann C., Sander P.; From Innovation to Impact: Embedding Sustainable Development Goals; 2nd World Congress on Industrial Engineering and Operations Management; 2025.