Gefördert durch:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht zum mFUND-Projekt AUFGEHTS

Vorhabenbezeichnung: Automatisiertes Verfahren zur Erstellung und Kalibrierung von Verkehrssimulationen auf Basis von Floating-Car-Daten

Zuwendungsempfänger	**FKZ**
Transcality AG	01F1170A
Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik (TUM-VT)	01F1170B

Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2023 bis 30.11.2024

Verfasser: Gladys Gan (Transcality), Gabriel Tilg (Transcality), Yamam Alayasreih (TUM-VT), Majid Rostami Shahrbabaki (TUM-VT)

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1 Kurze Darstellung 3

1.1 Aufgabenstellung 3
1.1.1 Hintergrund 3
1.1.2 Ziel des Projekts 3
1.1.3 Forschungslücke 4

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 5

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 6

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 7
1.4.1 Einführung in Verkehrssimulationsmodelle 7
1.4.2 FCD zur Verbesserung der Verkehrsplanung und des Verkehrsbetriebs 8
1.4.3 FCD in der Verkehrszustands- und Nachfrageschätzung 9

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 10

2 Eingehende Darstellung 10

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse 10
2.1.1 Fallstudie Grenzüberschreitender Korridor Bayern–Tirol (A93/A12)) 10
2.1.2 Daten 12
2.1.3 Ergebnisse 14
2.1.4 Diskussion der Fallstudienergebnisse 29
2.1.5 Ergebnisse aus dem Abschlussworkshop 30
2.1.6 Fazit 33
2.1.7 Zukünftige Arbeit 34

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 34
2.2.1 Transcality 34
2.2.2 TUM-VT 35

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 35

2.4 Voraussichtlicher Nutzen 35

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 37

2.6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses 37

2.7 Literaturverweise 38

Stichwortverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
AP	Arbeitspaket
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FCD	Floating Car Data
FD	Fundamentaldiagramm
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
GEH85	85. Perzentil der GEH-Statistik
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
Lkw	Lastkraftwagen
OSM	OpenStreetMap
Pkw	Personenkraftwagen
Q-Z	Quelle-Ziel
SDG	Sustainable Development Goals
SUMO	Simulation of Urban Mobility
TUM	Technischen Universität München
TUM-VT	Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

1.1.1 Hintergrund

Verkehrssimulationen sind ein weit verbreitetes Instrument in der Verkehrsplanung, da sie die Bewertung von Infrastruktur- und politischen Maßnahmen über gesamte Verkehrssysteme hinweg ermöglichen. Bei entsprechender Kalibrierung können diese Simulationen beobachtete Verkehrsbedingungen replizieren, indem sie realistische Verkehrsnachfragemuster einbeziehen. Dies erlaubt eine genauere Bewertung der Auswirkungen vorgeschlagener, komplexer Maßnahmen als es Handrechenverfahren tun. Entsprechend wird auch im Handbuch der Bemessung von Straßenverkehrsanlagen unter bestimmten Bedingungen die Anwendung „alternativer Verfahren“ (in diesem Zusammenhang: Verkehrssimulation) gefordert (FGSV, 2015).

Trotz ihrer Nützlichkeit sind Verkehrssimulationen in vielen Planungsprozessen noch nicht gängige Praxis. Handrechenverfahren werden weiterhin häufig verwendet, obwohl sie die Komplexität heutiger Verkehrsdynamiken oft nicht ausreichend erfassen können. Dies liegt größtenteils am erheblichen Aufwand, der für die Erstellung, Kalibrierung und Validierung von Simulationsmodellen erforderlich ist. Ein vollständiges Modell besteht aus drei zentralen Komponenten: einer Darstellung des Straßennetzes samt Systeme zur Verkehrssteuerung, einer Nachfrageschätzung, und einer Menge an kalibrierten Modellparametern, die zum Beispiel das Fahrverhalten bestimmen. Die Erstellung des Netzmodells, d.h. die Abbildung des Verkehrsangebots, ist in der Regel eine manuelle, zeitaufwändige Aufgabe. Gleichzeitig erfordert die Abschätzung der Verkehrsnachfrage den Zugang zu verlässlichen Daten, die häufig nicht verfügbar sind – insbesondere in kleineren Gemeinden ohne Verkehrssensorik. Wo Daten vorhanden sind, enden sie oft an Verwaltungsgrenzen aufgrund fragmentierter Zuständigkeiten zwischen Behörden.

Diese Herausforderungen verdeutlichen das Fehlen skalierbarer, automatisierter Methoden zur Erstellung und Kalibrierung von Verkehrsmodellen, die effizient und zuverlässig in verschiedenen Regionen anwendbar sind. Darüber hinaus haben diese Herausforderungen auch einen Bezug zu aktuellen politischen Anforderungen: der Digitalisierung von Planungsprozessen, der Förderung datenbasierter Mobilitätsinnovationen und der Ermöglichung grenzüberschreitender (verkehrsplanerischer) Zusammenarbeit, wie sie unter anderem durch Programme wie durch das mFUND des Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) und die UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDG 11: Nachhaltige Städte und Gemeinden) priorisiert werden.

1.1.2 Ziel des Projekts

Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung und Validierung einer automatisierten, skalierbaren und kosteneffizienten Methode zur Erstellung und Kalibrierung mesoskopischer Verkehrssimulationsmodelle. Der Nachweis der Machbarkeit liegt im Fokus. Der Ansatz konzentriert sich auf die Nutzung von Floating Car Data (FCD) als Hauptquelle für die Kalibrierung und bietet dabei mehrere zentrale Vorteile:

- Kommerzielle Verfügbarkeit, selbst in Regionen ohne Verkehrssensorik
- Grenzüberschreitende Abdeckung, die eine nahtlose Modellierung über administrative und nationale Grenzen hinweg ermöglicht

Die Fähigkeit zur Modellierung grenzüberschreitender Verkehrsströme ist ein zentrales Anliegen des Projekts. Der Verkehrsfluss endet nicht an Zuständigkeitsgrenzen, wohl aber

häufig die konventionelle Datenerhebung und Modellierung. Dies führt zu fragmentierten Simulationen, die die raumzeitliche Dynamik des Verkehrssystems nicht vollständig abbilden können. Der gewählte Testfall – der Korridor A93/A12 zwischen Bayern und Tirol – ist eine stark befahrene grenzüberschreitende Region, die diese Herausforderung verdeutlicht. Der gewählte Pilotkorridor ist von strategischer Bedeutung und dient als zentrale transalpine Verbindung für Güter- und Personenverkehr zwischen Deutschland und Österreich. Dies unterstreicht die dringende Notwendigkeit grenzübergreifender Modellierungsfähigkeiten. Durch die Integration von FCD und die Nutzung von OpenStreetMap (OSM) zur Netzgenerierung ermöglicht das entwickelte Verfahren die Erstellung grenzüberschreitender Simulationsmodelle, die für Verkehrsanalysen und auch für Planungen von Verkehrsmanagementmaßnahmen geeignet sind.

Neben der grenzüberschreitenden Anwendbarkeit standen folgende Ziele im Fokus des Projekts:

- *Modellerstellung*: Für die Modellerstellung werden als Datengrundlagen neben ggf. verfügbaren amtlichen Geodaten nur OSM-Daten verwendet. Es werden keine kommerziellen Geodaten eingespeist. Damit kann die Automatisierbarkeit, Kosteneffizienz und Übertragbarkeit des Verfahrens erhöht werden.
- *Modellkalibrierung*: Als Datengrundlagen werden neben Bestandsdaten nur FCD verwendet, um die Modelle zu kalibrieren. Es werden keine manuellen Verkehrszählungen durchgeführt. Dies trägt erneut zur Automatisierbarkeit, Kosteneffizienz und Übertragbarkeit des Verfahrens bei.
- *Verfahrensqualität*: Die Kalibrierungsgüte soll gängigen Normen der deutschen Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) genügen. Somit kann die praktische Anwendung der Modelle sichergestellt werden.
- *Verfahrenskosten*: Der Verfahrenspreis soll auf einem Niveau sein, wo die Leistbarkeit für eine durchschnittliche große Kommune gegeben ist (exklusive kommerzieller Daten). Somit kann die Anwendbarkeit auch für kleinere Kommunen sichergestellt werden.
- *Verfahrensdauer*: Die Verfahrensdauer soll zwei Wochen für eine durchschnittliche große Kommune nicht überschreiten. Dies trägt ebenso zur Anwendbarkeit des Verfahrens auch für kleinere Kommunen bei.

Das entwickelte Verfahren wurde mithilfe des Open-Source-Simulationswerkzeugs SUMO (Simulation of Urban Mobility), entwickelt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), implementiert und anhand der Fallstudie Bayern–Tirol getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, kalibrierte Verkehrsmodelle effizient mithilfe öffentlich zugänglicher und kommerziell verfügbarer Daten zu erstellen – auch für Regionen, die administrative Grenzen überschreiten. Das Verfahren leistet einen Beitrag zu einer zugänglicheren, konsistenteren und datenbasierten Verkehrsplanung.

1.1.3 Forschungslücke

Obwohl der Einsatz von FCD zur Verkehrsüberwachung weit verbreitet ist, bleibt die systematische Integration in (automatisierte) Kalibrierungsprozesse für Verkehrssimulationen bislang begrenzt. Bestehende Projekte konzentrieren sich häufig auf Netzanalysen oder historische Stauverläufe, ermöglichen jedoch nicht die Erstellung voll funktionsfähiger Simulationsmodelle – insbesondere nicht über Verwaltungsgrenzen hinweg.

AUFGEHTS schließt diese Lücke, indem es offene Geodaten (z. B. OSM), offizielle Verkehrszählungen und kommerziell verfügbare FCD in einem skalierbaren, weitgehend

automatisierten Verfahren kombiniert und so neues Potenzial für datenbasierte, grenzüberschreitende Verkehrsplanung erschließt.

Das Projekt zielt darauf ab, folgende zentrale Fragestellungen zu beantworten:

- Können auf Basis von OSM und amtlichen Geodaten Netzmodelle für Verkehrssimulationen mit ausreichender Genauigkeit erstellt werden?
- Können Datensätze aus der Fusion von amtlichen Daten (z.B. Schleifendetektordaten, historische Zähldaten) und proprietären Datensätzen (z.B. FCD) erstellt werden, welche zur Kalibrierung der grenzüberschreitenden Verkehrssimulation in ausreichender Qualität verwendet werden?
- Kann das Verfahren in einem ausreichend hohen Maße automatisiert werden, sodass die Verfahrenskosten und -dauer minimal sind, aber eine ausreichend hohe Ergebnisqualität gewahrt wird?

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt AUFGEHTS basierte auf einer Reihe günstiger Rahmenbedingungen, sowohl intern als auch extern. Intern verfügte das Projektkonsortium – bestehend aus der Transcality AG und dem Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München (TUM-VT) – über umfassende Expertise in den Bereichen Verkehrssimulation, Verkehrsmodellerstellung und Verkehrsdatenanalyse. Bereits vor Projektbeginn hatte das Team weitreichende Erfahrung im Umgang mit der Simulationssoftware SUMO gesammelt, einschließlich Netzerstellung, Nachfragemodellierung und Kalibrierungsprozessen. Darüber hinaus bestand praktische Erfahrung in der Verarbeitung und Analyse von FCD sowie in der Zusammenarbeit mit öffentlichen Auftraggebern und Ingenieurbüros, wodurch das Team gut auf die Projektziele vorbereitet war.

Hinsichtlich der Datenverfügbarkeit profitierte das Projekt von zwei wesentlichen Faktoren. Erstens bietet OSM eine robuste, kostenfreie und weltweit verfügbare Grundlage für die Erstellung von Straßennetzen, wodurch Lizenzkosten minimiert und Skalierbarkeit gewährleistet werden. Zweitens ermöglicht der Zugang zu FCD kommerzieller Anbieter für Deutschland und Österreich den angestrebten grenzüberschreitenden Ansatz. Der Zugang zu ausgewählten offiziellen Verkehrszähldaten (z. B. Daten aus Schleifendetektoren) ergänzte die Kalibrierungsgrundlage, wenngleich deren Abdeckung räumlich begrenzt war.

Extern stand das Projekt im Einklang mit übergeordneten Entwicklungen im Verkehrssektor. Das Projekt passt in die übergeordneten Ziele und dem Fokus auf digitale und datenbasierte Lösungen des mFUND und des BMDV. Zudem unterstrich die zunehmende strategische Bedeutung grenzüberschreitender Korridore – wie der Achse A93/A12 zwischen Bayern und Tirol – die Relevanz des gewählten Testfalls. Auch der Markt zeigte eine wachsende Nachfrage nach effizienten, kostengünstigen und skalierbaren Simulationslösungen, insbesondere bei kleineren Kommunen und regionalen Behörden ohne eigene Fachkompetenz.

Dennoch wurden bereits zu Beginn mehrere Herausforderungen identifiziert. Die schwankende Qualität und Auflösung von FCD, der zeitaufwändige Datenbeschaffungsprozess, potenzielle Unvollständigkeiten in offiziellen Verkehrsdaten sowie administrative Hürden bei der grenzüberschreitenden Datenintegration stellten einerseits Risiken für die Zielerreichung des Projekts dar. Andererseits bestätigte dies aber auch die Existenz eines entsprechenden Problemdrucks und den Bedarf für niederschwellige Verkehrsmodellierungslösungen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt AUFGEHTS folgte einer strukturierten, mehrphasigen Methodik, die sich an fünf zentralen Arbeitspaketen (APs) orientierte. Das übergeordnete Ziel war der Nachweis der Machbarkeit der Entwicklung und Validierung eines automatisierten Verfahrens zur Erstellung und Kalibrierung mesoskopischer Verkehrssimulationsmodelle auf Basis von FCD und offenen Geodaten.

Abbildung 1: AUFGEHTS Arbeitsablauf

Die Projektstruktur richtete sich nach den folgenden Kernaktivitäten:

- Datenbeschaffung und -aufbereitung, einschließlich offener Geodaten (z. B. OSM), offizieller Daten (z. B. Schleifendetektordaten) und kommerzieller FCD
- Einbindung von Stakeholdern, insbesondere regionaler und grenzüberschreitender Behörden, zur Sicherstellung von Datenzugang, Validierung und praktischer Anwendbarkeit
- Technische Entwicklung eines modularen, automatisierten Verfahrens für Netzgenerierung, Kalibrierung und Simulation
- Verfahrensvalidierung anhand synthetischer und realer Testszenarien
- Anwendung und Demonstration der Methodik anhand einer repräsentativen grenzüberschreitenden Fallstudie

Der folgende Abschnitt beschreibt die Arbeitspakete im Detail, ihre jeweilige Begründung und ihre Verbindung zu den übergeordneten Projektzielen. Die Arbeitspakete sind auch in Abbildung 1 dargestellt.

- **AP1 – Grundlagenermittlung**: Die Anfangsphase beinhaltete die systematische Überprüfung des wissenschaftlichen und technischen Stands der Technik mit Schwerpunkt auf datengetriebener Verkehrsmodellierung, Nutzung von FCD und Herausforderungen bei grenzüberschreitenden Simulationen. Auf Grundlage technischer, logistischer und strategischer Relevanz wurde der Grenzkorridor A93/A12 zwischen Bayern und Tirol als primärer Testfall ausgewählt. Die Einbindung relevanter Akteure erfolgte frühzeitig (in einer Vorprojektphase), um sicherzustellen, dass das Projekt praxisrelevante Bedürfnisse adressiert; Absichtserklärungen und Datenzugangsvereinbarungen wurden mit wichtigen regionalen Behörden unterzeichnet, darunter die ASFINAG Alpenstraßen AG, die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Südbayern, der Landkreis Miesbach und Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Mobilitätsplanung. Ein konzeptioneller Rahmen für das zu entwickelnde Verfahren wurde gemeinsam von Transcality AG und TUM-VT unter Einbindung von Fachleuten (z. B. wissenschaftliche Mitarbeiter anderer TUM-Forschungsgruppen) erarbeitet.
- **AP2 – Datenbeschaffung**: Nach dem konzeptionellen Entwurf ging das Projekt in die Phase der Datenbeschaffung über. In diesem Arbeitspaket wurden detaillierte Aspekte der Datenakquise geklärt. Angebote kommerzieller FCD-Anbieter wurden eingeholt und unter Berücksichtigung von Qualität, Abdeckung und Kosten evaluiert. Der Fokus der Datenakquise lag auf der Beschaffung hochaufgelöster Geschwindigkeitsprofile über die Zielregion hinweg. Zudem wurden relevante OSM-Ausschnitte zur Netzerstellung heruntergeladen und offizielle Schleifendetektordaten für Validierungszwecke gesammelt. Weitere Datensätze, wie bestehende VISUM-Modelle, die über Projektpartner bereitgestellt wurden, wurden zur Unterstützung der

Validierung integriert. Halbautomatisierte Arbeitsabläufe zur Datenaufnahme wurden entwickelt, um die verschiedenen Quellen zu verarbeiten, und die Datensätze zu bereinigen und zu harmonisieren. Besondere Aufmerksamkeit galt Plausibilitätsprüfungen zur Sicherstellung der Datenverlässlichkeit über Verwaltungsgrenzen hinweg.

- **AP3 – Verfahrensentwicklung**: Nach Abschluss der Datenbeschaffung begannen die algorithmischen Entwicklungsarbeiten. Algorithmen wurden zur Automatisierung der Simulationsnetzerstellung aus OSM-Daten implementiert, wobei SUMO als Simulationssoftware genutzt wurde. Aus FCD abgeleitete Geschwindigkeitsprofile wurden zur Ermittlung von Verkehrsstärken verarbeitet und in das bestehende Nachfrageschätzverfahren von Transcality integriert. Eine wesentliche Innovation bestand in der methodischen Erweiterung, FCD nicht nur zur Validierung von Verkehrsbedingungen, sondern auch zur Schätzung plausibler Nachfragemuster zu nutzen – ein entscheidender Schritt zur Reduzierung der Abhängigkeit von räumlich begrenzt verfügbaren Zähldaten. Der Entwicklungsansatz legte Wert auf Reproduzierbarkeit, d. h. auf die Nutzung typischer Datenstandards, und auf Konsistenz mit der grundlegenden Theorie zum Verkehrsablauf.
- **AP4 – Verfahrensvalidierung**: Nach Abschluss der algorithmischen Entwicklung trat das Projekt in die Validierungsphase ein. Zur Bewertung des Verfahrens wurden sowohl synthetische Datensätze (auf Basis des Simulationsmodells erzeugt) als auch reale Daten aus dem Korridor Bayern–Tirol verwendet. Die Qualität des aus dem Verfahren resultierten Modells wurde anhand etablierter Standards entsprechend dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS; FGSV, 2015) bewertet. Sensitivitätsanalysen wurden durchgeführt, um die Auswirkungen von Qualitätsunterschieden in den FC-Datensätzen auf die Modellgenauigkeit zu untersuchen.
- **AP5 – Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit**: Das abschließende Arbeitspaket widmete sich der Aufbereitung und Verbreitung der Projektergebnisse sowie der Förderung der praktischen Anwendung der entwickelten Methode. Die Projektergebnisse wurden umfassend dokumentiert, um eine Nachnutzung zu ermöglichen. Eine Posterpräsentation wurde beim Deutschen Straßen- und Verkehrskongress (DSVK) der FGSV im Jahr 2024 gehalten. Darüber hinaus wurde ein offener Workshop im Januar 2025 organisiert, an dem Vertreter von regionalen Planungsbehörden und Ingenieurbüros teilnahmen. Der Workshop beleuchtete mögliche Anwendungsfälle, nahm Rückmeldungen auf und demonstrierte das AUFGEHTS-Verfahren einem breiten Publikum.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Einführung in Verkehrssimulationsmodelle

Verkehrssimulation ist sowohl in der Forschung als auch in der Praxis eine weitgehend anerkannte Methode zur Analyse und Bewertung von Verkehrssystemen. Sie unterstützt die Ausgestaltung infrastruktureller und organisatorischer Maßnahmen sowie Verkehrsmanagementmaßnahmen. In Deutschland wird Simulation in offiziellen Richtlinien, wie denen der FGSV, als „Alternativverfahren“ anerkannt, um die Komplexität realer Verkehrszusammenhänge abzubilden, d.h., wenn die Anwendungsgrenzen manueller Berechnungsverfahren überschritten werden, (FGSV, 2015). Im wissenschaftlichen Kontext werden Simulationsmodelle zur methodischen Validierung, für theoretische Untersuchungen und als Bestandteil digitaler Zwillinge zur integrierten Systemanalyse eingesetzt.

Zu den gängigen Simulationswerkzeugen zählen PTV Vissim, PTV Visum, Aimsun Next und die Open-Source-Software SUMO. Diese Werkzeuge werden je nach Anwendung in

unterschiedlichem Detaillierungsgrad – mikroskopisch, mesoskopisch oder makroskopisch – eingesetzt. Allerdings bieten kommerzielle Simulationswerkzeuge derzeit keine integrierte Unterstützung für die vollständig automatisierte Modellerstellung und -kalibrierung. Ingenieurinnen und Ingenieure müssen Netze weiterhin manuell konfigurieren, Eingangsdaten bereitstellen und Kalibrierungsparameter anpassen.

Ein entscheidender Faktor in simulationsgestützten Studien ist die Kalibrierung der Modelle zur Sicherstellung ihrer Aussagekraft. Wie im EU-COST-Projekt MULTITUDE (COST Action TU0903) gezeigt wurde, wird die Modellkalibrierung in der Praxis häufig unzureichend behandelt. In vielen Fällen erfolgt die Kalibrierung manuell. Die Parameter werden entweder systematisch oder nach dem Trial-and-Error-Prinzip angepasst, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt wird. Dieses Vorgehen ist nicht standardisiert, wenig transparent und schwer reproduzierbar, wodurch sich das Risiko erhöht, fehlerhafte Schlussfolgerungen aus den Modellergebnissen zu ziehen. Zwar existieren in der Literatur systematische Kalibrierungsansätze, etwa optimierungsbasierte Methoden (z.B.: Hale et al., 2015), diese werden jedoch in angewandten Projekten nur selten umgesetzt.

1.4.2 FCD zur Verbesserung der Verkehrsplanung und des Verkehrsbetriebs

In der aktuellen Forschung zu Verkehrsüberwachung, -modellierung und -simulation hat sich FCD als wertvolle Ressource etabliert. Erfasst von Fahrzeugen mit GPS oder Kommunikationsgeräten, beinhalten FCD Informationen zu Position, Geschwindigkeit und ggf. zu fahrzeugspezifischen Merkmalen wie Abständen. Im Gegensatz zu herkömmlichen stationären Sensoren bieten FCD eine breitere räumliche Abdeckung. Allerdings ist der Durchdringungsgrad nur selten bekannt und wird von den Anbietern nicht veröffentlicht. Die grenzüberschreitende Verfügbarkeit, hohe zeitliche Auflösung und zunehmende kommerzielle Zugänglichkeit machen FCD besonders relevant für die moderne Verkehrsmodellierung.

Der Einsatz von FCD wurde in mehreren Forschungsprojekten im Kontext von Verkehrsüberwachung, Datenfusion oder Verkehrsnachfrageabschätzung untersucht, jedoch bleibt die systematische Integration von FCD in Prozesse zur Erstellung und Kalibrierung von Simulationsmodellen bisher begrenzt.

Das Projekt ROSY[1] konzentrierte sich auf das Management und die Nutzung von FC-Datensätzen zur Unterstützung von Verkehrsdatenoperationen. Es beinhaltete Verfahren zur Aktualisierung von Simulationsmodellen mit FCD, jedoch waren diese Modelle makroskopischer Natur und wurden weder automatisiert erstellt noch kalibriert. Das Projekt OD-FCD[2] hatte zum Ziel, die Darstellung der Verkehrsnachfrage zu verbessern. Es umfasste jedoch weder die Erstellung noch die Kalibrierung von Simulationsmodellen, noch wurde Automatisierung im Simulationskontext betrachtet. Im Projekt TempoS[3] wurde FCD für das Systemmanagement auf Autobahnen genutzt, jedoch nicht im Rahmen von Simulationsmodellierung oder Kalibrierungsprozessen eingesetzt. Im Projekt KI-NN-FAND[4] wurden KI-Methoden verwendet, um aus kontinuierlichen Zähldaten Rückschlüsse auf Fahrtzwecke und Akteurstypen zu ziehen. Der Fokus lag auf der verbesserten Interpretierbarkeit traditioneller Sensordaten, ohne dabei FCD oder Simulationswerkzeuge zu verwenden. Das Projekt verkehrsvis verfolgte das Ziel, ein Dashboard zur Visualisierung von Schleifendetektordaten der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) zu

[1] ROSY: https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/opendata-zur-ermittlung-verkehrsstroeme-rosy.html
[2] OD-FCD: https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/od-fcd.html
[3] TempoS: https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/tempos.html
[4] KI-NN-FAND: https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/nn-fand.html

entwickeln. Seine Hauptfunktion war deskriptiv und diente der Darstellung aktueller Verkehrszustände.

1.4.3 FCD in der Verkehrszustands- und Nachfrageschätzung

In der Forschung wird FCD vielfach zur Schätzung zentraler Verkehrskenngrößen wie Geschwindigkeit, Verkehrsdichte und Verkehrsstärke verwendet. Seo et al. (2015) schlugen eine Methode zur Rekonstruktion von Verkehrszuständen vor, die Abstands- und Positionsdaten von Fahrzeugen mit Fahrerassistenzsystemen nutzt und auf den physikalischen Gesetzen der Masseerhaltung basiert, um die Abstände zu aggregieren. Dieser Ansatz vermeidet die Abhängigkeit von vorab definierten Fundamentaldiagrammen (FDs), deren Genauigkeit durch Annahmen zu Modellparametern beeinträchtigt sein kann. Han et al. (2022) führten eine Methode zur Verarbeitung von Streaming-Daten ein, bei der der Verkehr in Schockwellenepisoden segmentiert wird. Die Geschwindigkeit dieser Schockwellen wird mithilfe bayes‘scher Regression geschätzt, und Newells Fahrzeugfolge-Theorie wird angewendet, um Fahrzeugzahlen und Durchdringungsgrade von FCD-Fahrzeugen aus Trajektorien zu bestimmen. Dies ermöglicht eine Interpolation zur Rekonstruktion von Verkehrszuständen.

Mehrere Studien haben FCD für die Abschätzung von Verkehrsflüssen eingesetzt. Anuar et al. (2015) kombinierten Geschwindigkeitsdaten von Fahrzeugen mit kalibrierten FDs und stellten fest, dass das Van-Aerde-Modell unter Staubedingungen besonders effektiv ist. Mahajan et al. (2023) setzten Deep-Learning-Methoden ein und nutzten LSTM-Netzwerke zur Schätzung des Verkehrsflusses anhand von Streckengeschwindigkeitsdaten sowie exogener Merkmale wie Straßentyp, Fahrstreifenzahl, Geschwindigkeitsbegrenzung und Tageszeit. Das Modell unterstützte Transfer Learning und konnte auf neue Städte mit begrenzten Flussdaten übertragen werden. Der Ansatz zeigte insbesondere auf Straßentypen mit starker Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Fluss – etwa auf Fernstraßen und Autobahnen – eine hohe Leistungsfähigkeit.

Auch im Bereich der Quelle-Ziel-(Q-Z)-Schätzung gewinnt FCD zunehmend an Bedeutung. Mitra et al. (2020) entwickelten eine Methode zur direkten Ableitung statischer Q-Z-Matrizen aus GPS-Trajektorien, wobei auf traditionelle Umlegungsmodelle und Nachfrageschätzungen verzichtet wurde. Ihre Methode leitet eine Umlegungsmatrix aus beobachteten Pfaden ab und formuliert die Q-Z-Schätzung als ein Matrixskalierungsproblem unter Einbeziehung von Verkehrszählungen. Sie erzielte gute Ergebnisse selbst bei niedrigen Durchdringungsgraden der FCD-Fahrzeuge. Ceccato et al. (2022) verglichen FCD-basierte und traditionelle Q-Z-Schätzmethoden und kamen zu dem Schluss, dass FCD-basierte Matrizen – bei entsprechender Anpassung hinsichtlich Durchdringungsgrad und Repräsentativität – eine vergleichbare Genauigkeit bei geringeren Kosten erreichen können.

Trotz ihrer weiten Verbreitung in der Verkehrsmodellierung konzentrieren sich die meisten bestehenden Anwendungen von FCD auf makroskopische Modelle oder Zustandsabschätzungen. Die detaillierte Kalibrierung mesoskopischer oder mikroskopischer Simulationen, die automatisierte Modellerstellung oder Kalibrierungsprozesse sowie die Integration in Simulationsumgebungen bleiben bisher weitgehend unberücksichtigt. Darüber hinaus greifen viele Forschungsstudien auf hochauflösende FCD zurück, die häufig aus spezialisierten Quellen stammen und kommerziell kaum zugänglich sind. Der Einsatz aggregierter, kommerzieller FCD-Daten als Input für die Modellierung ist in der Literatur bislang nur wenig untersucht.

Die meisten Simulationsmodelle stützen sich daher nach wie vor auf stationäre Sensoren, was ihre Skalierbarkeit insbesondere in datenarmen oder grenzüberschreitenden Regionen einschränkt. FCD bieten jedoch ein vielversprechendes Potenzial zur Verbesserung der

Erstellung und Kalibrierung von Verkehrssimulationen. Dieses Projekt greift dieses Potenzial auf und entwickelt ein automatisiertes, skalierbares Verfahren, das FCD als primäre Eingangsquelle für die Modellerstellung und Kalibrierung nutzt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit externen Akteuren war ein zentrales Element des Projekts AUFGEHTS, sowohl um den Zugang zu erforderlichen Datenquellen sicherzustellen als auch um die methodische Entwicklung an praktischen Anforderungen zu validieren.

Partnerschaften wurden mit mehreren öffentlichen Institutionen aufgebaut. Auf österreichischer Seite unterstützte die ASFINAG Alpenstraßen GmbH das Projekt durch die Bereitstellung historischer Schleifendetektordaten entlang des A12-Korridors. Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Südbayern stellte auf deutscher Seite (A93) Verkehrszähldaten zur Verfügung. Der Landkreis Miesbach trug mit ergänzenden Datenquellen bei, während das Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Mobilitätsplanung Zugang zu relevanten Mobilitätsdatensätzen, einschließlich Daten aus dem Tiroler VISUM-Modell und von Schleifendetektoren, bereitstellte. Die aktive Beteiligung dieser Behörden war entscheidend, um ein realistisches und repräsentatives Validierungsumfeld für das entwickelte Verfahren zu schaffen.

Über die reine Datenbereitstellung hinaus umfasste die Zusammenarbeit mit den Stakeholdern auch praktische Validierungs- und Disseminationsmaßnahmen. In der Abschlussphase des Projekts wurde ein offener Workshop organisiert, an dem Vertreter von Ingenieurbüros und Verkehrsplanungsbehörden aus Deutschland, der Schweiz und Österreich teilnahmen. Ihr Feedback war entscheidend für die Bewertung der Anwendbarkeit und Übertragbarkeit des entwickelten Verfahrens auf reale Planungsprozesse, sowie die Betrachtung möglicher zukünftiger Forschungsaktivitäten.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Dieser Abschnitt stellt die im Verlauf des Projekts entwickelten algorithmischen und technischen Details vor und konzentriert sich auf die Arbeitspakete: Datenbeschaffung, Verfahrensentwicklung und Verfahrensvalidierung.

Das Projekt verfolgte das Ziel der Entwicklung eines automatisierten, skalierbaren Verfahrens zur Erstellung und Kalibrierung mesoskopischer Verkehrssimulationsmodelle unter Nutzung von FCD und offenen georäumlichen Datensätzen. Dies ermöglicht eine skalierbare simulationsgestützte Verkehrsplanung.

Die folgenden Abschnitte führen in die Fallstudie ein, beschreiben die verfügbaren Daten und präsentieren die Ergebnisse, einschließlich der entwickelten Methodik, ihrer Leistungsfähigkeit sowie einer kritischen Diskussion der Erkenntnisse und der nächsten Schritte.

2.1.1 Fallstudie Grenzüberschreitender Korridor Bayern–Tirol (A93/A12))

Die Fallstudie zur Validierung des entwickelten Verfahrens konzentriert sich auf den Grenzübergang A93/A12 zwischen Bayern und Tirol sowie die umliegenden Gebiete (siehe Abbildung 2). Dieser Korridor stellt eine zentrale Verbindung im europäischen Güter- und Personenverkehr dar, indem er Deutschland mit Österreich verbindet und sich über den Brennerpass weiter in Richtung Italien erstreckt. Er wurde als repräsentativer Testfall

ausgewählt, um die Praxistauglichkeit, Flexibilität und Genauigkeit des Verfahrens unter realen Bedingungen zu bewerten.

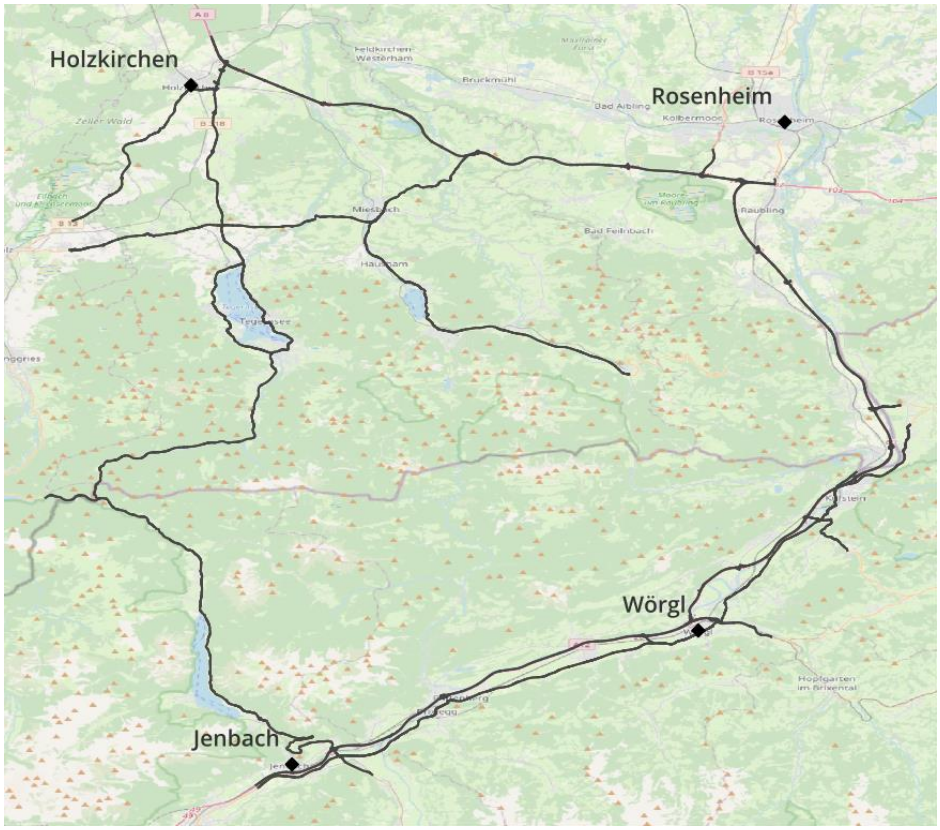

Abbildung 2: Fallstudie: Hauptstraßen im grenzüberschreitenden Korridor Bayern–Tirol (Quelle: OSM)

Der Korridor überschreitet mehrere Verwaltungsgrenzen und umfasst verschiedene öffentliche Behörden und Zuständigkeiten, wodurch er ein relevantes Umfeld darstellt, um einen der zentralen Vorteile der entwickelten Methodik zu demonstrieren: die Nutzung einer einheitlichen Datenquelle (FCD) anstelle räumlich fragmentierter Datensätze unterschiedlicher Akteure. Dieser einheitliche Datenansatz ermöglicht die Modellerstellung auch in datenarmen oder grenzüberschreitenden Regionen, in denen konventionelle Sensoren wie Schleifendetektoren die räumliche Dimension unvollständig oder inkonsistent abdecken können.

Die Region ist durch ein hohes Aufkommen grenzüberschreitenden Verkehrs geprägt, insbesondere durch schwere Nutzfahrzeuge, die Waren entlang des wichtigen EU-Korridors transportieren. Verkehrssteuernde Maßnahmen auf dem Korridor umfassen variable Geschwindigkeitsbegrenzungen, separate Fahrstreifen für Lastkraftwagen (Lkw), zeitliche Dosierregelungen für den Güterverkehr an der Grenze sowie temporäre Fahrstreifensperrungen. Diese betrieblichen Besonderheiten stellen eine modelltechnische Herausforderung dar, wie in der Analyse der Ergebnisse gezeigt wird (siehe Abschnitt 2.1.3.2).

Zur Vereinfachung der Analyse bei gleichzeitiger Wahrung der Relevanz konzentriert sich die Fallstudie auf Straßen, die in OSM als „motorway“, „trunk“ oder „primary“ klassifiziert sind (in Abbildung 2 schwarz dargestellt). Diese Straßen bilden die Hauptachsen des Fern- und Güterverkehrs und schließen die Hauptverbindungen der angrenzenden Städte und Gemeinden ein. Aufgrund ihrer starken Frequentierung weisen sie auch eine höhere Abdeckung durch FCD-Fahrzeuge auf, was die Zuverlässigkeit bei der Schätzung von Geschwindigkeit und Verkehrsstärke verbessert.

Das Hauptziel dieser Fallstudie besteht darin, das entwickelte Verfahren zu testen. D.h., ein Simulationsmodell ausschließlich auf Basis von FCD und offenen Geodaten zu erstellen und zu prüfen, ob ein solches Modell in der Lage ist, die Verkehrszustände entlang eines bedeutenden internationalen Korridors realitätsnah abzubilden. Die Methode ist so konzipiert, dass sie keine stationären Sensoren erfordert, wodurch sie auf andere Regionen übertragbar ist.

2.1.2 Daten

Im Folgenden befindet sich eine Zusammenfassung der erhobenen Datensätze und deren Verwendung im Projekt.

2.1.2.1 OpenStreetMap-Daten

OSM ist ein kollaboratives Projekt, das eine frei verfügbare, bearbeitbare Weltkarte mit detaillierten Daten zu verschiedenen geografischen Merkmalen bereitstellt, einschließlich umfassender Straßennetzdaten (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzungen, Zufahrtsbeschränkungen, Anzahl der Fahrstreifen). Die Kartendaten werden kontinuierlich von Mitwirkenden aktualisiert. OSM wurde als Grundlage für die Netzerstellung verwendet. Das Untersuchungsgebiet der Fallstudie wurde im Februar 2024 aus OSM heruntergeladen.

2.1.2.2 VISUM-Daten

VISUM ist eine kommerzielle Verkehrsmodellierungssoftware, die von öffentlichen Stellen häufig zur Analyse von Verkehrsnachfrage und Infrastruktur auf regionaler und nationaler Ebene eingesetzt wird. Sie erlaubt dem Anwender unter anderem die Erzeugung von Q-Z-Matrizen auf Grundlage soziodemografischer Daten, Flächennutzungsdaten, sowie Daten zum Verkehrsangebot. Diese Q-Z-Matrizen wurden als Eingangsgrößen im Schritt der Nachfrageschätzung des AUFGEHTS-Verfahrens verwendet. In diesem Projekt kamen das Bayerische Landesverkehrsmodell, entwickelt vom Bayerischen Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr im Jahr 2022, sowie das Tiroler Modell, bereitgestellt von der Abteilung Mobilitätsplanung des Landes Tirol zur Darstellung des Mobilitätsverhaltens vor 2020, zum Einsatz.

2.1.2.3 Floating Car Daten

FCD beinhalten Verkehrsinformationen, die von Fahrzeugen mit GNSS-Empfängern, wie z. B. GPS-Systemen, erfasst werden. Diese Systeme ermöglichen es, unter anderem Position und Geschwindigkeit jedes Fahrzeugs in regelmäßigen Abständen aufzuzeichnen. Dies geschieht typischerweise einmal pro Sekunde bis einmal pro Minute, abhängig von der verbauten Hardware und der verwendeten Kommunikationstechnologie. FCD-Fahrzeuge können verschiedensten Flotten zugehören und somit verschiedene Fahrzeugklassen repräsentieren.

Für dieses Projekt wurde FCD von HERE Analytics bezogen. Die Rohdaten der FCD-Fahrzeuge wurden auf Straßensegmentebene aggregiert und in 5-Minuten-Intervallen zusammengefasst. Jeder Dateneintrag enthält eine zeitlich gemittelte Geschwindigkeit auf dem Segment sowie unterstützende Statistiken wie:

- Die Anzahl der FCD-Fahrzeuge („car count“), die zur Messung beigetragen haben
- Die minimale, maximale und standardisierte Abweichung der aufgezeichneten Geschwindigkeiten
- Einen Vertrauensindex (von 0 bis 100), der die Zuverlässigkeit jedes Datenpunkts angibt

Die räumliche Segmentierung des FCD basierte auf den OSM-“ways”, was eine direkte Integration in das aus OSM-Daten erzeugte Simulationsnetz ermöglichte. Das FCD deckte

einen Zeitraum von drei Monaten ab, vom 1. Oktober bis zum 31. Dezember 2023. Die tatsächliche Verteilung der beinhalteten Fahrzeugklassen im in diesem Projekt verfügbaren FC-Datensatz war nicht bekannt.

2.1.2.4 Schleifendetektordaten

Verkehrszähldaten wurden von der ASFINAG Alpenstraßen GmbH, der Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Südbayern, dem Landkreis Miesbach, sowie dem Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Mobilitätsplanung bereitgestellt (siehe Abbildung 3). Die Datenquellen waren je nach Region Schleifendetektoren, Tripel-Detektoren (Radar, Ultraschall, Infrarot) oder Kamerasysteme.

Die Daten lagen in Intervallen zwischen 1 und 60 Minuten vor und bezogen sich auf unterschiedliche Zeiträume in den Jahren 2021 bis 2023. Sie umfassten Fahrzeugzählungen nach Typ, überwiegend in den Kategorien Personenkraftwagen (Pkw) und Lastkraftwagen (Lkw), wobei einige Datensätze eine feinere Differenzierung ermöglichten.

Die Schleifendetektordaten wurden hauptsächlich zur Validierung verwendet. Sie dienten dem Vergleich von beobachteten und simulierten Verkehrsstärken und -geschwindigkeiten, um die Modellgenauigkeit auf ausgewählten Autobahnabschnitten zu bewerten. Darüber hinaus wurden die Schleifendaten in Transcalitys bestehendem Kalibrierungs- und Nachfrageschätzverfahren eingesetzt, um eine Referenz für die Qualität des durch das AUFGEHTS-Verfahren erzeugten Modells zu erhalten.

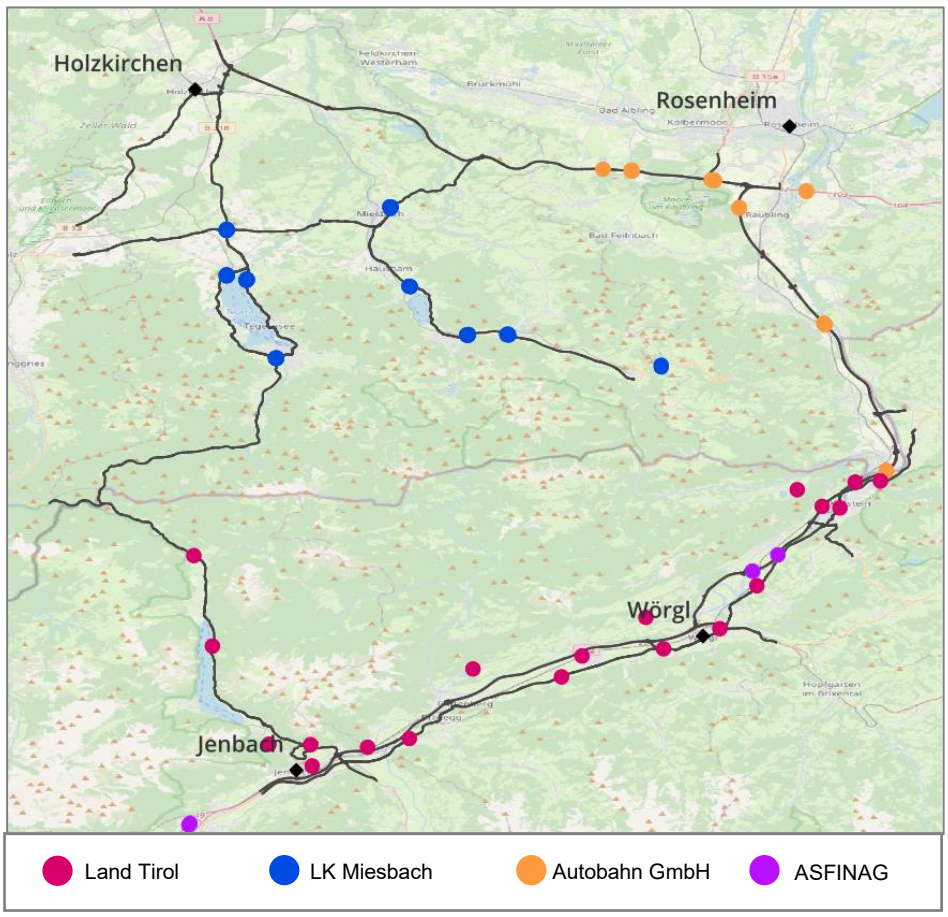

Abbildung 3: Standorte der von den Behörden bereitgestellten Schleifendetektoren im Fallstudiengebiet.

2.1.3 Ergebnisse

Die im Rahmen dieses Projekts entwickelte Methodik basiert auf dem Einsatz der Open-Source-Verkehrssimulation SUMO in mesoskopischer Auflösung, wodurch eine detaillierte, zugleich aber recheneffiziente Simulation der Verkehrsdynamik ermöglicht wird. Zusätzlich basiert sie auf einem von Transcality entwickeltem Datenmodell, welches den hochautomatisierten Bezug von OSM-Daten ermöglicht.

Das Verfahren integriert FCD in mehreren Schritten: zunächst zur Verbesserung der Qualität des Simulationsnetzes durch Aktualisierung der (Höchst-)Geschwindigkeitsattribute basierend auf beobachtetem Fahrverhalten, und anschließend zur Abschätzung der Verkehrsstärken mittels eines Algorithmus, der auf dem FD des Verkehrsflusses basiert. Diese Verkehrsstärkeschätzungen dienen als Eingangsgrößen für Transcalitys proprietäres, endogenes Nachfrageschätzverfahren, das zeitaufgelöste Q-Z-Matrizen für die Simulation generiert. Dieses Verfahren fundiert auf simulationsbasierten Optimierungsmethoden. Abschließend wird das resultierende Modell anhand von Schleifendetektordaten validiert, wobei sowohl Verkehrsstärken als auch Geschwindigkeiten mit den beobachteten Werten verglichen werden. Der Gesamtansatz ermöglicht eine skalierbare, datenbasierte Verkehrsmodellierung in Regionen mit begrenzter Sensordichte oder über Verwaltungsgrenzen hinweg.

Das entwickelte Verfahren besteht aus mehreren aufeinanderfolgenden Schritten (siehe Abbildung 4):

1. **Netzerstellung**
    a. Erstellung eines detaillierten, fahrstreifengenauen Simulationsnetzes auf Basis von OSM
    b. Integration von FCD-Geschwindigkeiten zur Verbesserung der Netzattribute
2. **Schätzung der Verkehrsstärke**
    a. Erstellung eines synthetischen FDs
    b. Anwendung eines Algorithmus basierend auf FDs und FCD-Geschwindigkeiten zur Verkehrsstärkeschätzung
    c. Auswahl von Kanten für weitere Verfahrensschritte auf Grundlage von Datenverfügbarkeit und Netztopologie
3. **Erstellung des Simulationsmodells**
    a. Anwendung des Verfahrens zur endogenen Nachfrageschätzung von Transcality
    b. Ausführung der mesoskopischen Verkehrssimulation mit SUMO
4. **Modellvalidierung**
    a. Vergleich der simulierten Ergebnisse zu Verkehrszuständen mit empirischen Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsdaten aus Schleifendetektoren

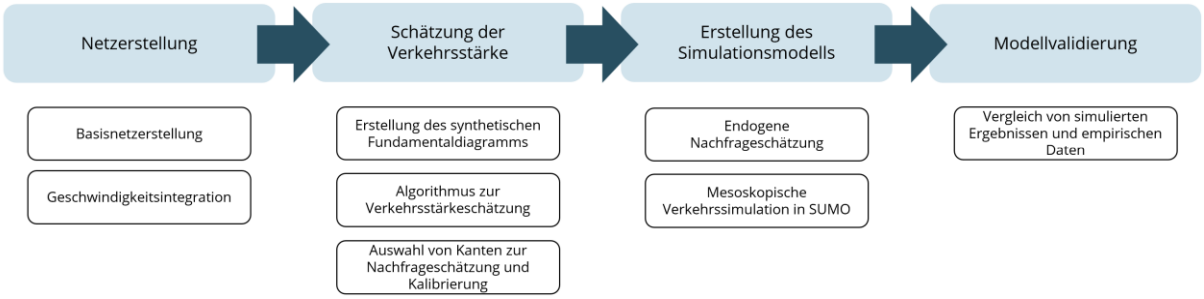

Abbildung 4: Übersicht über das AUFGEHTS-Verfahren

Das in dieser Studie verwendete Simulationsmodell basiert auf der mesoskopischen Simulationsauflösung in SUMO. Dieser Modelltyp stellt einen Kompromiss zwischen der

rechentechnischen Effizienz makroskopischer Modelle und dem fahrverhaltensbezogenen Detailgrad mikroskopischer Modelle dar. Die Fahrzeugbewegung wird mithilfe von FDs simuliert, wobei auch individuelle Fahrzeugrouten und Netzinteraktionen berücksichtigt werden.

Im Vergleich zu makroskopischen Modellen bietet das mesoskopische Modell mehrere Vorteile:

- Realistischere Abbildung von Fahrdynamik und Stauentstehung
- Stochastische Modellierung von Kapazitäten
- Hohe zeitliche Auflösung (Simulationsschritte von 1 Sekunde)
- Verbesserte Genauigkeit der Reisezeiten auf individuellen Routen

Während mikroskopische Modelle einen noch höheren Detailgrad ermöglichen (z. B. Beschleunigung, Spurwechselverhalten), erfordern sie deutlich mehr Rechenressourcen und Kalibrierungsaufwand, was die Abbildung größerer Netze oft erschwert. Der mesoskopische Ansatz bietet ein skalierbares und ausreichend detailliertes Rahmenwerk für die Zielsetzungen dieses Projekts.

Das Modell unterstützt die Analyse von Verkehrsflüssen, Reisezeiten, Stauzeiten und Q-Z-Matrizen. Die Simulationsergebnisse werden mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten erzeugt und für die Validierung mit empirischen Daten auf Stundenniveau aggregiert.

2.1.3.1 Entwickeltes Verfahren

Basisnetzerstellung

Der erste Schritt im Modellierungsprozess ist die Erstellung eines detaillierten, fahrstreifengenauen Verkehrsnetzes in SUMO, wobei OSM als grundlegende Datenquelle dient. OSM stellt umfassende georäumliche Informationen bereit, darunter Straßenverläufe, Fahrstreifenkonfigurationen, Kreuzungslayouts sowie zugehörige Attribute wie Geschwindigkeitsbegrenzungen und Zufahrtsbeschränkungen.

Das auf OSM basierende Netz wurde mithilfe automatisierter Algorithmen verarbeitet und in das SUMO-Format überführt. Dabei wurde sichergestellt, dass Hauptstraßen, Abbiegestreifen und Knotenpunkte einschließlich ihrer vollständigen topologischen Struktur enthalten sind. Der Schwerpunkt des Netzmodells lag auf dem überregionalen Straßennetz.

Zur Sicherstellung der Qualität und Vollständigkeit des Simulationsnetzes wurden Korrekturroutinen angewendet, um fehlende oder inkonsistente Daten zu erkennen und zu beheben. Beispielsweise wurden fehlende Abbiegeverbindungen oder fehlerhaft ausgerichtete Fahrstreifendaten aus dem ursprünglichen OSM-Eingang automatisch korrigiert. Dieser Ansatz verringerte den Bedarf an manuellen Eingriffen und stellte sicher, dass das Netz topologisch valide und für das Routing und die Umlegung in SUMO einsatzbereit war.

VISUM-Netzmodelle wurden sowohl für Bayern als auch für Tirol beschafft. Die Möglichkeit, Daten aus diesen Netzen zu integrieren, wurde geprüft; dabei wurden jedoch mehrere Einschränkungen festgestellt. Die beiden Modelle wiesen nachvollziehbarerweise Inkonsistenzen in der Netzgeometrie auf und unterschieden sich in ihrer räumlichen Auflösung – konkret hatte das bayerische Modell eine geringere Auflösung in Tirol, während das Tiroler Modell eine geringere Auflösung in Bayern aufwies. Zudem fehlten teilweise notwendige Angaben zu für das AUFGEHTS-Projekt wichtige Attribute, deren Validierung oder Ergänzung einen erheblichen manuellen Aufwand erfordert hätte. Aus diesem Grund wurde OSM als besser geeignete Grundlage für die Erstellung des Basisnetzes bewertet.

Geschwindigkeitsintegration

Während OSM für jedes Straßensegment ausgeschilderte Geschwindigkeitsbegrenzungen bereitstellt, sind diese Angaben teils unvollständig. Zusätzlich muss diese Höchstgeschwindigkeit für Simulationszwecke zusätzlich angepasst werden, um realistische, gefahrene Höchstgeschwindigkeiten abbilden zu können. Daher wurden die entsprechenden Netzattribute auf Basis von FCD ergänzt, um die Realitätsnähe der Simulationsergebnisse zu verbessern. D.h., die auf FCD basierenden Geschwindigkeitsinformationen wurden verwendet, um die Geschwindigkeitsattribute des Simulationsnetzes anzupassen und somit eine realitätsnähere Ausgangsbasis für Kalibrierung und Simulation bereitzustellen.

Die FCD-Integration berücksichtigt nicht nur die gesetzlichen Geschwindigkeitsbegrenzungen, sondern auch reale Fahrmuster, die durch Faktoren wie Straßenkrümmung, Steigungen und Neigungen sowie Witterungsbedingungen beeinflusst werden. So reduzieren Verkehrsteilnehmende beispielsweise auf kurvigen oder abschüssigen Streckenabschnitten ihre Geschwindigkeit, selbst wenn die gesetzlich zulässige Höchstgeschwindigkeit höher liegt.

Um Genauigkeit und Robustheit zu vereinen, wurde für alle Straßentypen mit Ausnahme von Autobahnen das 90. Perzentil der beobachteten Maximalgeschwindigkeiten pro Segment als Referenzwert gewählt. Abbildung 5 zeigt die Verteilung von beobachteten FCD-Maximalgeschwindigkeiten auf einem Segment einer Bundes-/Landesstrasse über fünf Tage in fünfminütigen Intervallen. Der Großteil der Werte liegt unterhalb der gesetzlichen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Daher wurde das 90. Perzentil (73 km/h) als aktualisierte Geschwindigkeitsgrenze übernommen. Auf Autobahnen wurde das 50. Perzentil zur Aktualisierung der Segmentgeschwindigkeit verwendet, da jenes mit der Richt- bzw. Höchstgeschwindigkeit gut übereinstimmte.

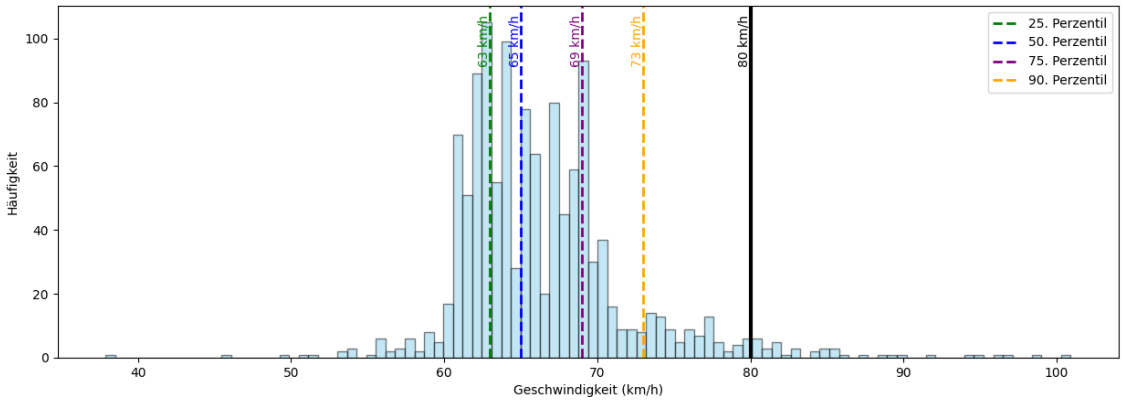

Abbildung 5: Histogramm der beobachteten Höchstgeschwindigkeiten an eines Beispielsegments über mehrere Tage

Die Geschwindigkeitsattribute im Simulationsnetz wurden für jeden Kalibrierungstag aktualisiert, sodass das Modell tagesabhängige Variationen im Fahrverhalten abbilden konnte, etwa reduzierte Geschwindigkeiten bei ungünstigen Witterungsbedingungen.

Erstellung des synthetischen Fundamentaldiagramms

Das FD stellt die Beziehung zwischen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und durchschnittlicher Geschwindigkeit auf einem Straßensegment dar. Die Methode zur Verkehrsstärkeschätzung basiert auf der Annahme, dass das FD eines Segments in der Simulation reproduziert werden kann und zur Ableitung beobachteter Verkehrsbedingungen genutzt werden kann.

Zur Erstellung des FD für ein ausgewähltes Kalibrierungssegment wurde ein lokales Teilnetz erzeugt, indem der Simulationsbereich stromauf- und stromabwärts erweitert wurde – typischerweise bis zur nächsten größeren Kreuzung. Dadurch wurde sichergestellt, dass Randbedingungen und Netzrestriktionen realistisch in den Simulationsergebnissen abgebildet werden.

Auf jedes Teilnetz wurde ein künstliches Nachfrageprofil mit schrittweise zunehmender Fahrzeugeingabe angewendet. Dadurch entstand ein Spektrum an Verkehrszuständen, von freiem Fluss bis zu Stausituationen. Die resultierenden Verkehrsdaten wurden in SUMO in fünfminütigen Intervallen exportiert und lieferten segmentbezogene Messwerte zu durchschnittlichem Fluss, Dichte und Geschwindigkeit. Diese Datenpunkte wurden anschließend zur Erstellung des FD für jedes Straßensegment verwendet (siehe Abbildung 6).

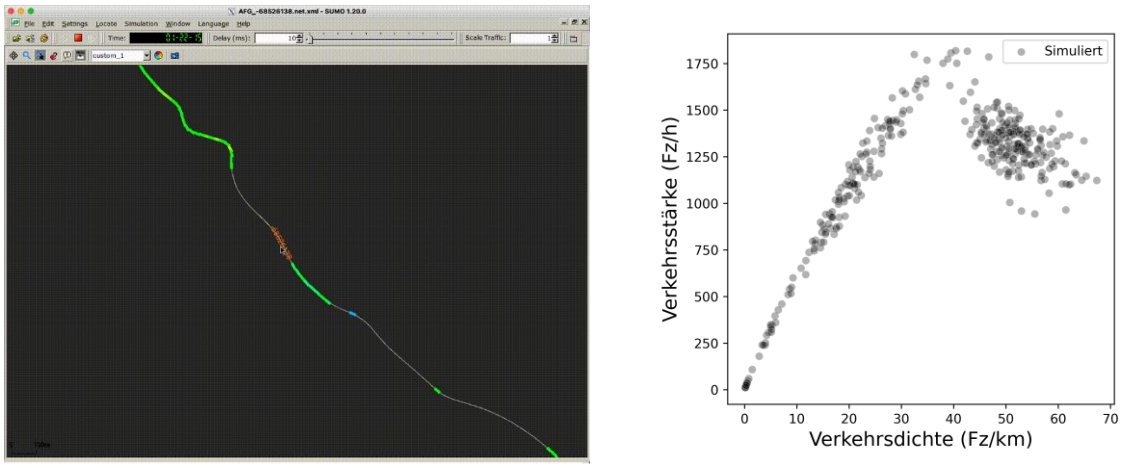

Abbildung 6: Simulierte Fahrzeuge in einem Teilnetz (links) zur Generierung von Messungen von Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und durchschnittlicher Geschwindigkeit für das FD (rechts)

Es ist zu beachten, dass der Ansatz außerdem davon ausgeht, dass das FD eine stabile Eigenschaft des Straßensegments darstellt und nicht von der jeweils angewendeten Nachfrage abhängt. Dies steht im Einklang mit der klassischen Verkehrsflusstheorie (z. B. Daganzo, 1997), in der das FD als intrinsische Eigenschaft betrachtet wird, die sich aus der Infrastruktur, dem Fahrverhalten und Umweltbedingungen ergibt. Diese Annahme gilt in einfachen Netztopologien, hat jedoch Einschränkungen in komplexen Szenarien (z. B. in Verflechtungsbereichen), in denen das FD durch die Q-Z-Muster beeinflusst wird. Auf diese Einschränkung wird bei der Auswahl der Segmente, auf die die Methode angewendet wird, Rücksicht genommen, wie in einem späteren Abschnitt beschrieben wird.

Algorithmus zur Verkehrsstärkeschätzung

Ziel des Algorithmus ist es, die Verkehrsstärke unter Verwendung der zuvor erstellten FDs für jedes Segment aus den beobachteten Geschwindigkeiten der FCD-Fahrzeuge abzuleiten. Dieser Ansatz ermöglicht die Umwandlung von FCD-basierenden Geschwindigkeitsdaten in geschätzte Verkehrsstärken, die als zentrale Eingangsgrößen für den endogenen Nachfrageschätzprozess dienen. Abbildung 7 veranschaulicht den Algorithmus unter verschiedenen Szenarien.

Für jedes Segment und Zeitintervall (5-Minuten-Auflösung) durchläuft der Algorithmus die folgenden Schritte:

1. **Filterung des FD**: Im ersten Schritt wird das FD gefiltert, um nur den für den Geschwindigkeitsabgleich zu betrachtenden Bereich einzugrenzen. Dies geschieht für

das jeweilige Segment auf Grundlage der beobachteten Durchschnittsgeschwindigkeit der FCD-Fahrzeuge im betrachteten Zeitintervall. Um Schwankungen zu berücksichtigen und eine ausreichende Abdeckung sicherzustellen, wählt der Algorithmus alle Datenpunkte im Freifluss-Bereich des FD aus, deren Geschwindigkeiten bis zu 15 km/h unterhalb der beobachteten Durchschnittsgeschwindigkeit liegen. Dies ergibt eine reduzierte Menge an Verkehrszuständen, die mit der beobachteten Geschwindigkeit konsistent sind und gleichzeitig eine gewisse Toleranz bewahren.

2. **Schätzung der Verkehrsdichte auf Basis der Anzahl an FCD-Fahrzeugen:** Innerhalb des gefilterten FD-Bereichs wird die Dichte basierend auf der relativen Anzahl beobachteter FCD-Fahrzeuge geschätzt. Konkret wird das Verhältnis der aktuellen Anzahl an FCD-Fahrzeugen zum maximalen Tageswert auf diesem Segment als linear mit der Verkehrsdichte korreliert angenommen. Dieses Verhältnis wird auf den Dichtebereich des gefilterten FD angewendet, um einen repräsentativen Dichtewert auszuwählen.
3. **Bestimmung der Verkehrsstärke**: Ausgehend von der ausgewählten Dichte wird der entsprechende Wert der Verkehrsstärke aus dem FD ausgelesen. Falls der Dichtewert keinem exakten Punkt im FD entspricht, wird der Fluss durch lineare Interpolation zwischen den nächstgelegenen FD-Punkten berechnet.
4. **Umgang mit Grenzfällen:** In bestimmten Fällen kann die beobachtete Durchschnittsgeschwindigkeit außerhalb des FD-Bereichs liegen:
    a. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten (oberhalb des FD-Bereichs) wird die höchste im FD verfügbare Geschwindigkeit verwendet.
    b. Bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten wird angenommen, dass die Kapazität erreicht ist und die Verkehrsstärke wird auf den maximalen Wert (Kapazität) des FD gesetzt. Dies führt dazu, dass das im Nachgang angewandte endogene Nachfrageschätzverfahren eine maximale Nachfrage für diese Kante ansetzt, und dadurch Stauzustände erreicht werden können.
    c. Treten niedrige Geschwindigkeiten gemeinsam mit einer geringen Anzahl an FCD-Fahrzeugen auf, ist besondere Vorsicht geboten, da dies auf langsam fahrende Einzelfahrzeuge (z.B. Lkw) statt auf tatsächliche Staus hindeuten kann.
5. **Aggregation zur stündlichen Verkehrsstärke:** Der gesamte Ablauf wird für jedes der zwölf 5-Minuten-Intervalle innerhalb einer Stunde wiederholt. Die resultierenden Schätzwerte werden anschließend gemittelt, um einen einzigen Stundenwert für die Verkehrsstärke auf dem Segment zu erhalten.

Diese Methode ermöglicht die Rekonstruktion von Zeitreihen für Verkehrsflüsse aus FCD-Daten, die ansonsten keine direkten Verkehrsmengenmessungen enthalten.

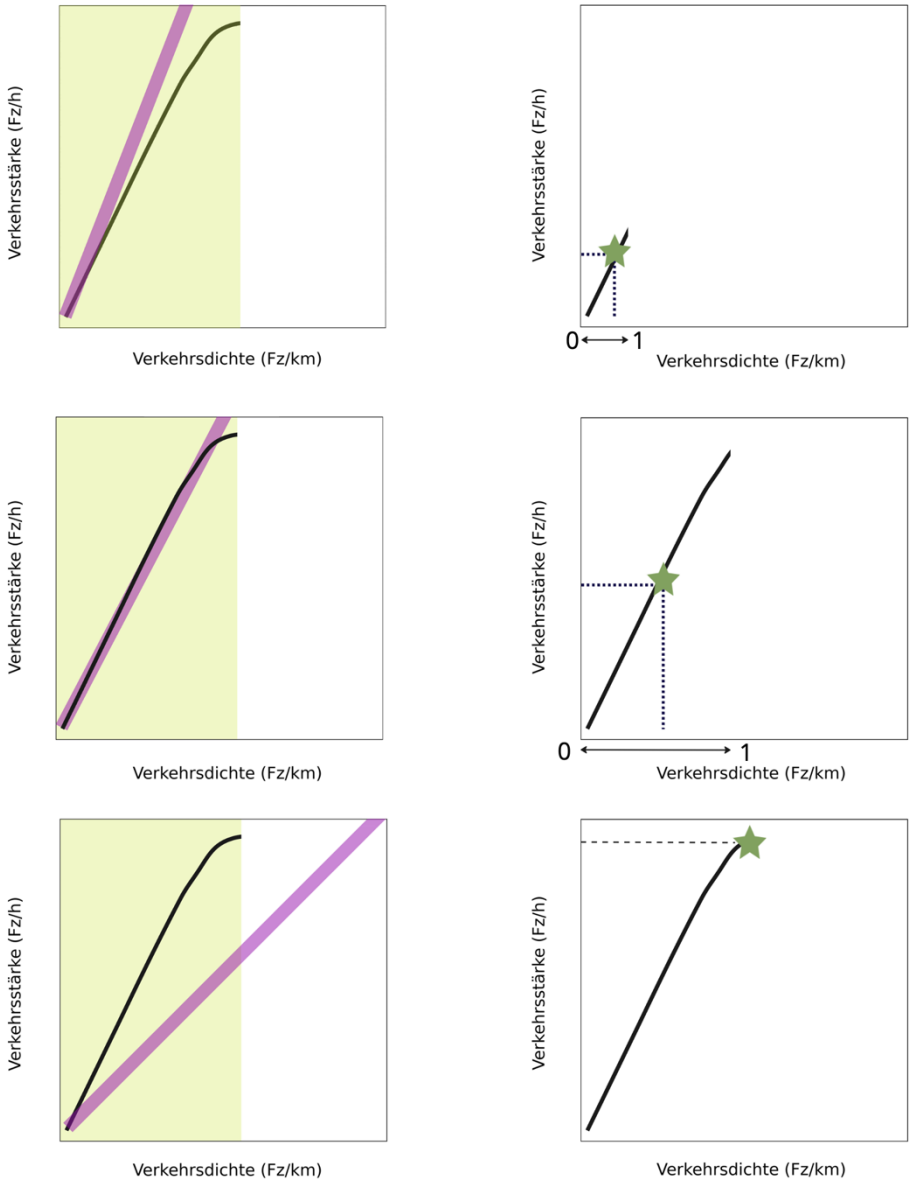

Abbildung 7: Visualisierung des Algorithmus Schätzung der Verkehrsstärke.

Auswahl von Kanten zur Nachfrageschätzung und Kalibrierung

Zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der Nachfrageschätzung auf Basis von FCD wurde der Algorithmus gezielt auf Autobahnen und Hauptstraßen angewendet, auf denen die Abdeckung durch FCD-Fahrzeuge in der Regel dichter und konsistenter ist. Die FCD-Qualität ist auf höherklassigen Straßen tendenziell besser, da dort höhere Verkehrsaufkommen existieren und seltener Datenlücken vorkommen, d.h., Zeitintervalle ohne Beobachtungen von FCD-Fahrzeugen. Zudem ist die Korrelation zwischen der Anzahl der FCD-Fahrzeuge und der tatsächlichen Verkehrsdichte auf höherklassigen Straßen im Allgemeinen stärker als auf lokalen Straßen.

Da der Algorithmus zur Nachfrageschätzung sowohl die durchschnittliche beobachtete Geschwindigkeit als auch die Anzahl der FCD-Fahrzeuge pro Straßensegment berücksichtigt, wurde eine gezielte Stichprobenstrategie zur Auswahl robuster Eingabesegmente entwickelt. Dabei wurde zwischen jedem Autobahnanschluss (Ein- und Ausfahrt) jeweils ein repräsentatives Segment identifiziert. Ausgewählt wurde jeweils das Segment mit der höchsten Anzahl an FCD-Fahrzeugen, um sicherzustellen, dass die verwendeten Daten möglichst zuverlässig und repräsentativ für den betreffenden Streckenabschnitt waren.

Die Auswahl der Segmente basierte auf folgenden Regeln:

- **Netzstruktur:** Kalibrierungssegmente wurden zwischen logisch definierten Anfangs- und Endpunkten eines Abschnitts gewählt. Ein Anfangssegment ist ein Segment mit mehr als einem eingehenden Segment (z. B. nach einer Auffahrt), ein Endsegment eines mit mehr als einem ausgehenden Segment (z. B. vor einer Abfahrt). Segmente kürzer als 150 m sowie Randsegmente wurden ausgeschlossen, da dort Staurückwirkungen nicht oder nur unzureichend abgebildet werden und somit ungenaue FD-Kurven resultieren.
- **Verkehrstrennung:** Segmente unmittelbar nach Auffahrten (wo Einfädelverhalten auftritt) oder unmittelbar vor Abfahrten (wo sich Fahrzeuge auf Abbiege- und Durchgangsspuren verteilen) wurden nicht berücksichtigt, da an diesen Stellen die Geschwindigkeit stark von der gewählten Spur abhängt und somit der Gesamtverkehrszustand des Segments verzerrt dargestellt werden könnte.
- **FCD-Häufigkeit:** Ein Mindestwert von 50 FCD-Fahrzeugen pro Segment und Tag wurde vorausgesetzt, um eine statistisch belastbare Analyse zu gewährleisten.

Zur Veranschaulichung der Unterschiede in Qualität und Verhalten von FCD auf verschiedenen Straßentypen zeigen Abbildung 8 und Abbildung 9 die Anzahl der FCD-Fahrzeuge und die Geschwindigkeitsprofile auf zwei ausgewählten Segmenten – eines auf einer Autobahn, eines auf einer Bundes-/Landesstraße. In beiden Fällen sind die täglichen FCD-Fahrzeuganzahlen sowie die beobachteten und imputierten Durchschnittsgeschwindigkeiten dargestellt.

Weitere Filterkriterien – etwa auf Basis der Standardabweichung der Geschwindigkeit, von Vertrauenswerten oder der Position im Netz – können in zukünftigen Forschungsaktivitäten untersucht werden, um die Robustheit der Verkehrsstärkeschätzung weiter zu verbessern.

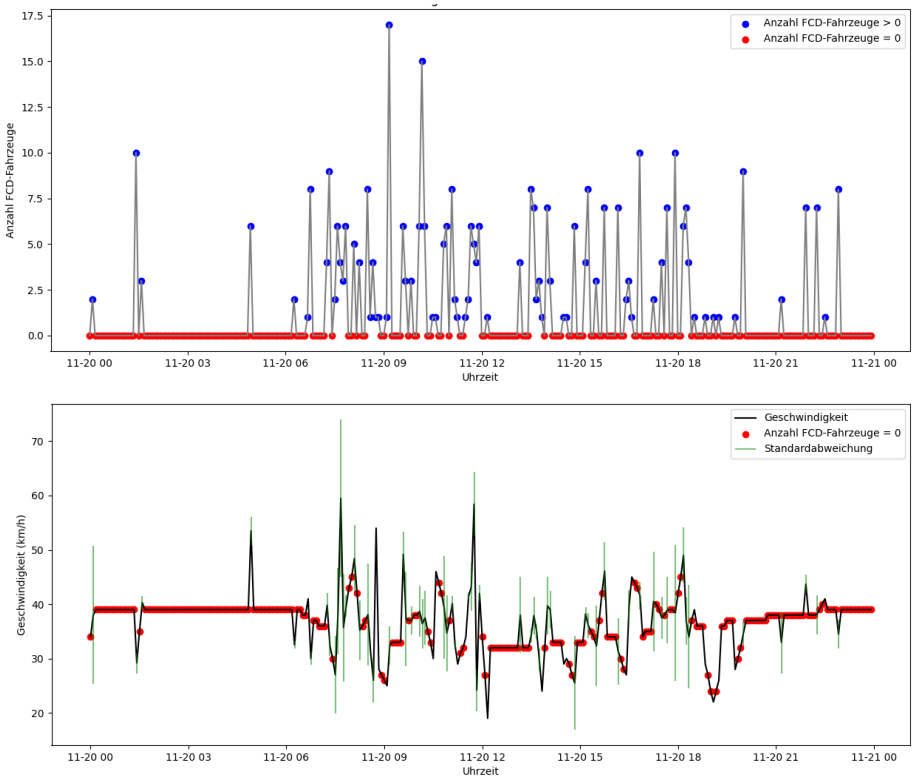

Abbildung 8: FCD eines Beispielabschnitts einer Hauptstraße. Oben: Anzahl der FCD-Fahrzeuge auf dem Abschnitt an einem bestimmten Tag. Unten: Beobachtete und berechnete Durchschnittsgeschwindigkeiten auf dem Abschnitt an einem bestimmten Tag.

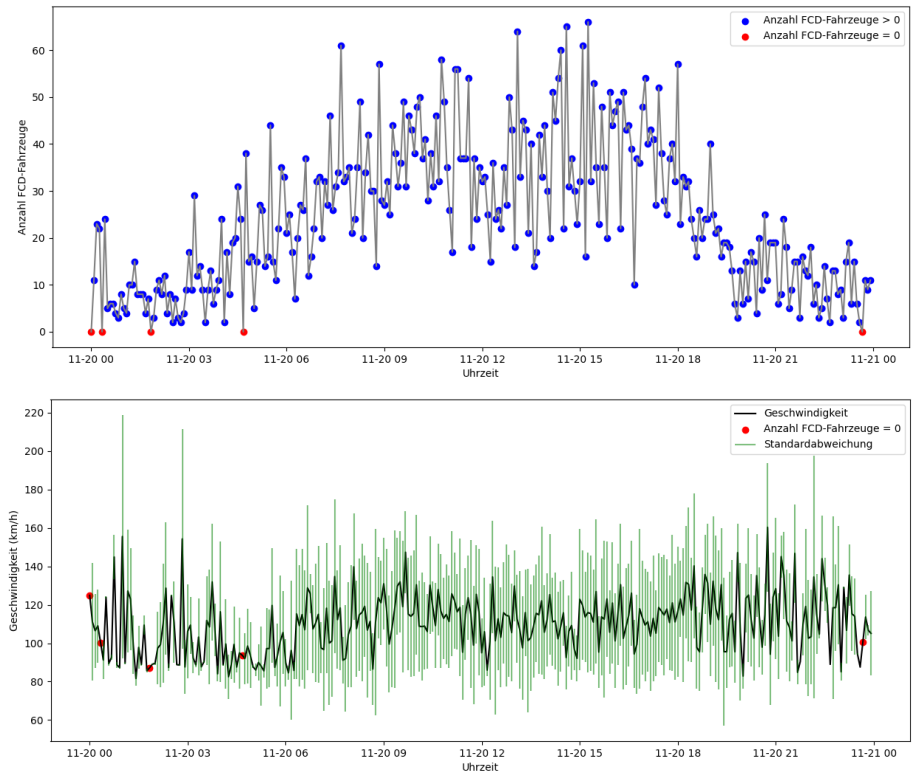

Abbildung 9: FCD eines beispielhaften Autobahnabschnitts. Oben: Anzahl der FCD-Fahrzeuge auf dem Abschnitt an einem bestimmten Tag. Unten: Beobachtete und berechnete Durchschnittsgeschwindigkeiten auf dem Abschnitt an einem bestimmten Tag.

Endogene Nachfrageschätzung

Mit den geschätzten Verkehrsstärken der ausgewählten Segmente wird die Verkehrsnachfrage mithilfe einer endogenen Methodik geschätzt. Das Verfahren wurde von Transcality entwickelt und eingesetzt. Es basiert auf einem Least-Squares-Fitting-Ansatz gemäß der von Cascetta (1984) vorgeschlagenen Methodik. Solche Ansätze haben in jüngerer Zeit auch in der Forschungswelt erneut an Bedeutung gewonnen, da sie in der Praxis relevant sind und heute durch die erheblich gestiegene Rechenleistung besser umsetzbar sind (z. B. Osorio, 2019).

Ziel der endogenen Nachfrageschätzung ist es, die empirischen Verkehrsflüsse mit den simulierten, gewählten Routen in Einklang zu bringen, sodass die Gesamtheit aller gewählten Routen der Fahrzeuge zu Verkehrsstärken führt, die den beobachteten Zählwerten an den Detektorpositionen entsprechen. Dies erfolgt durch Berechnung einer Q-Z-Matrix für das Simulationsnetz. Die Q-Z-Matrix besitzt eine räumliche Auflösung von 2000 Metern, wobei das Modellgebiet in Rasterzellen mit einer Größe von 2000 x 2000 Metern unterteilt wird.

Aus dieser Q-Z-Matrix wird basierend auf der Netztopologie und den vorherrschenden Verkehrsbedingungen in jedem Zeitintervall eine umfassende Menge möglicher Routen erzeugt. In einem iterativen Prozess werden die Routenentscheidungen der Verkehrsteilnehmenden schrittweise so angepasst, dass sie die beobachtete Verkehrssituation widerspiegeln. Dabei werden auch Kapazitäten von Fahrstreifen und Knotenpunkten berücksichtigt, die innerhalb des Simulationsmodells endogen abgeleitet und nicht im Vorfeld festgelegt werden. Zusätzlich enthält das Modell eine lognormalverteilte Routenlänge, um das empirisch beobachtete Reiseverhalten abzubilden. Die Nachfrage wird in 15-Minuten-Intervallen geschätzt, wodurch eine tageszeitspezifische Kalibrierung möglich ist.

Die endogene Nachfrageschätzungsmethode von Transcality wird üblicherweise mit Daten aus Schleifendetektoren verwendet. In mehreren früheren Projekten konnte gezeigt werden, dass diese Methode zuverlässige Ergebnisse im Hinblick auf die GEH-Statistik liefert. Daher wurde im vorliegenden Projekt dieselbe Methode eingesetzt, jedoch mit aus FCD und simulierten FDs rekonstruierten Verkehrsstärkewerten. Dadurch ist der neue Ansatz sowohl mit traditionellen Datenquellen kompatibel als auch in Regionen mit geringer oder fehlender Detektordichte einsetzbar.

Als Eingangswert für die Nachfrageschätzung wurden QZ-Matrizen aus bestehenden VISUM-Modellen verwendet, anstatt eine zufällige Anfangsnachfrage zu generieren. Die bereits zuvor erwähnten zwei Regionalmodelle standen zur Verfügung: das Bayerische Landesverkehrsmodell und das Tiroler Regionalmodell. Unterschiede in den Zonierungssystemen und der räumlichen Auflösung beider Modelle erschwerten jedoch die simultane Integration. Insbesondere unterschieden sich die Verkehrsanalysezonen (engl. *traffic analysis zones*, TAZs) in Größe, Abdeckung und Struktur, mit teils überlappenden und inkonsistenten Bereichen entlang der Staatsgrenze (siehe Abbildung 10). Da das bayerische Modell einen größeren Teilperimeter des Modellgebiets abdeckte, wurde entschieden, mit dem bayerischen VISUM-Modell als Ausgangsnachfrage fortzufahren. Die TAZs dieses Modells wurden auf das SUMO-Netz abgebildet, um mit der Struktur des endogenen Nachfrageschätzungsverfahrens kompatibel zu sein.

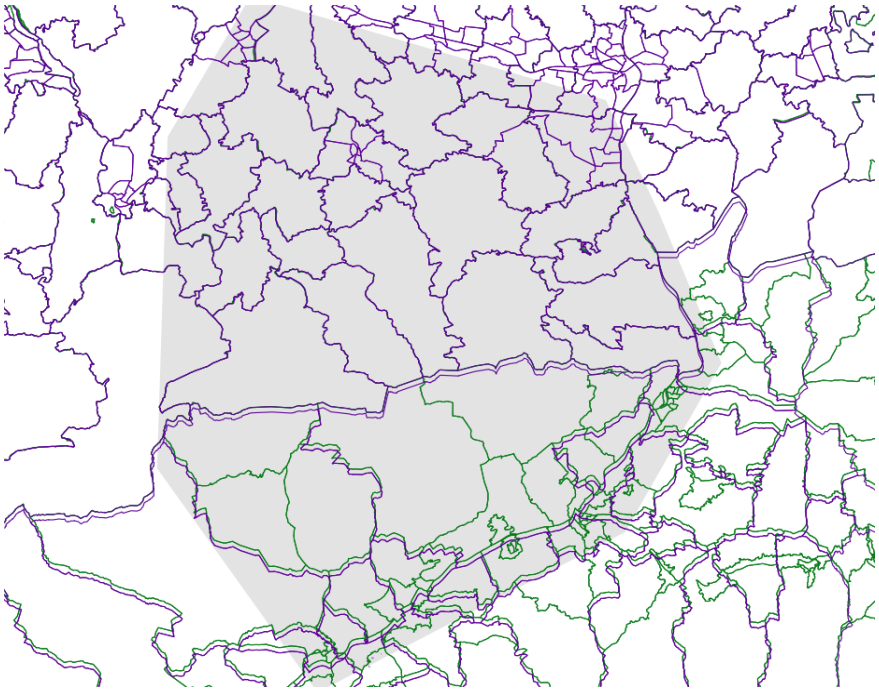

Abbildung 10: Überlagerung der VISUM-Verkehrszonen Bayerns (lila) und Tirols (grün) innerhalb des Fallstudiengebiets (grau schattiert).

Mesoskopische Verkehrssimulation in SUMO

Der endogene Ansatz ermöglicht eine tagesspezifische sowie stundenfeine Nachfrageschätzung. Verhaltensparameter, wie beispielsweise solche, die die Zeitlücken beeinflussen, werden mithilfe empirischer Daten kalibriert, die Aufschluss über entsprechende Zeitlücken geben. Dies verbessert die realitätsnahe Abbildung der Verkehrsflussdynamik im Modell.

Die im Simulationsmodell verwendeten Verhältnisse der Fahrzeugklassen wurden aus Schleifendetektordaten mit klassifizierten Fahrzeugzählungen abgeleitet. Über alle Detektoren im Untersuchungsgebiet hinweg lag der durchschnittliche Anteil des Lkw-Verkehrs bei etwa 20 %. Dieser Anteil wurde heuristisch auf Lkw- und Sattelkraftfahrzeuge in der SUMO-Simulation übertragen. Die Anteile der Fahrzeugtypen wurden anschließend im Rahmen der Nachfrageschätzung verwendet, indem simulierten Fahrten im gesamten Netz unterschiedliche Fahrzeugtypen zugewiesen wurden.

Tabelle 1: Anteile der Fahrzeugklassen

Fahrzeugklasse	Anteil
PKW	0.72
Lieferwagen	0.08
LKW	0.19
Sattelkraftfahrzeuge	0.01

2.1.3.2 Validierung

Die Modellergebnisse wurden anschließend mithilfe von Schleifendetektordaten validiert, wobei der Fokus sowohl auf Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten lag. Die simulierten Verkehrsflüsse wurden mit den von Detektoren aufgezeichneten Fahrzeugzahlen verglichen, während die simulierten Geschwindigkeiten sowohl mit Schleifendaten als auch mit FCD

abgeglichen wurden. Der Geschwindigkeitsvergleich diente dazu, sicherzustellen, dass die Verkehrsdynamik realitätsgetreu abgebildet wurde.

Die Validierung erfolgte an Detektoren mit konsistenter Datenverfügbarkeit, die mit den kalibrierten Tagen übereinstimmten.

Es ist zu beachten, dass die geschätzten Verkehrsstärken aus dem Schätzalgorithmus nicht immer direkt mit den Detektorzählwerten validiert werden konnten, da sich die Detektorstandorte nicht zwangsläufig mit den Segmenten decken, die den Auswahlkriterien für den Algorithmus entsprechen. Daher wurde die Validierung auf Basis der simulierten Ergebnisse des kalibrierten Modells durchgeführt.

Kalibrierung mit Schleifendetektordaten

Zum Benchmarking des AUFGEHTS-Verfahrens wurden dem Simulationsnetz insgesamt 133 Detektoren zugeordnet, was zu 69 Kanten mit Verkehrsstärkedaten auf Autobahnen und übergeordneten Straßen führte. Diese setzten sich aus 6 Autobahnkanten, 4 Autobahn-Zufahrts- und Abfahrtskanten, 54 Kanten auf Bundes- und Landesstraßen sowie 5 Verbindungsrampen und Anschlusskanten zusammen.

Die Kalibrierung und Nachfrageschätzung erzielte zufriedenstellende Ergebnisse. Das 85. Perzentil der GEH-Statistik (GEH85) lag über alle stündlichen Intervalle hinweg für alle betrachteten Straßentypen unter dem Grenzwert von 8. Insbesondere für Autobahnen blieben die GEH-Werte durchgehend unter 5, was auf eine gute Modellqualität entsprechend der FGSV-Normen schließen lässt (siehe Abbildung 11, links).

Die simulierten Geschwindigkeiten wurden anhand gefilterter FCD validiert. Die Filterung wurde wie folgt durchgeführt: Um die Zuverlässigkeit der Geschwindigkeitsdaten aus dem FC-Datensatz sicherzustellen, wurden Kanten anhand der Datenverlässlichkeit und Geometrie gefiltert. Eine Kante wurde als zuverlässig eingestuft, wenn über 80 % aller betrachteten 5-Minuten-Intervalle einen Konfidenzwert von mindestens 80 % aufwiesen, wobei der Konfidenzwert ein Attribut des gelieferten FC-Datensatzes war. Nur diese Intervalle wurden beibehalten und zu 15-Minuten-Intervallen aggregiert. Ein 15-Minuten-Intervall galt als gültig, wenn es gültige Daten aus mindestens zwei der drei 5-Minuten-Intervalle enthielt.

Zur weiteren Verbesserung der Vergleichbarkeit mit Simulationsergebnissen und zur Reduktion von Artefakten mussten die Kanten eine Länge zwischen 50 und 1500 Metern aufweisen. Diese Einschränkung diente dazu, unzuverlässige Vergleiche aufgrund extrem kurzer oder langer Streckenabschnitte zu vermeiden.

Der mediane prozentuale Fehler zwischen simulierten und beobachteten Geschwindigkeiten betrug 8,9 %, was eine gute Übereinstimmung mit den empirischen Reisegeschwindigkeiten belegt.

Kalibrierung mit dem AUFGEHTS-Verfahren

Für das AUFGEHTS-Verfahren wurden Verkehrsstärkeschätzungen, die aus FCD und FDs abgeleitet wurden, als Eingaben für die endogene Nachfrageschätzungsmethode verwendet. Ziel dieses Ansatzes war es, die Machbarkeit zu evaluieren, konventionelle Schleifendetektordaten durch FCD als Datensatz für die Modellkalibrierung zu ersetzen.

Aufgrund der netzweiten Verfügbarkeit von FCD konnten die Kalibrierungseingaben flexibel ausgewählt werden. Um jedoch Inkonsistenzen zwischen benachbarten Segmenten zu minimieren und die Komplexität des Kalibrierungsproblems zu reduzieren, wurde die Anzahl der Eingabekanten begrenzt. Pro Netzabschnitt, definiert als der Straßenabschnitt zwischen

Knotenpunkten (FGSV, 2008), an denen Fahrzeuge in den Hauptkorridor ein- oder ausfahren können, wurde jeweils eine Kante ausgewählt (siehe Abschnitt 2.1.3.1).

Insgesamt wurden 59 Netzkanten als Basis für die Kalibrierung und Nachfrageschätzung ausgewählt. Autobahnauffahrten und -abfahrten wurden ausgeschlossen, da dort aufgrund geringer Verkehrsmengen und unzureichender FCD-Abdeckung die Schätzung der Verkehrsstärke als weniger zuverlässig eingestuft wurde. Das kalibrierte Modell wurde gegen dieselben 69 Kanten validiert, die auch in der Kalibrierung des Vergleichsmodells verwendet wurden und auf welchen sich entsprechend Schleifendetektoren befinden.

Auf den ersten Blick erwies sich die erzielte Qualität des Verfahrens als niedriger im Vergleich zur detektorbasierten Ausgangsbasis. Der GEH85-Wert überschritt in allen stündlichen Intervallen den Schwellenwert von 10 und erreichte maximal 24. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich über die meisten Straßentypen hinweg, wobei insbesondere auf Anschlussrampen von Autobahnen durchgehend höhere GEH-Werte beobachtet wurden (siehe Abbildung 11, rechts).

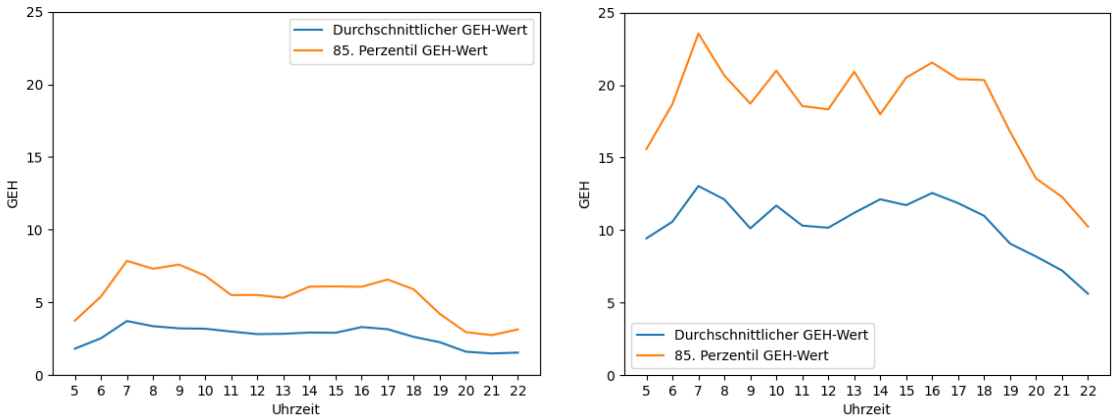

Abbildung 11: Durchschnittlicher GEH-Wert und 85. Perzentil GEH-Wert im Netz in jedem Stundenintervall (links: Kalibrierung mit Schleifendetektordaten; rechts: Kalibrierung mit dem AUFGEHTS-Verfahren)

Detaillierte Analyse der Ergebnisse

Eine weitergehende Auswertung der Ergebnisse wurde durchgeführt, um Fehlerquellen zu identifizieren und die Fähigkeit des Modells zur Einhaltung des FGSV-Qualitätsstandards (GEH85 < 5) zu bewerten. Die Resultate wurden dabei nach Straßentypen differenziert betrachtet.

Auf Autobahnen lag die Gesamtgröße der simulierten Verkehrsflüsse im realistischen Bereich, obwohl diese Segmente nicht direkt als Kalibrierungseingaben verwendet wurden. Der Vergleich der simulierten Verkehrsflüsse mit den empirischen ist in Abbildung 12 dargestellt. Dies deutet darauf hin, dass sich die Verkehrszustände plausibel durch das Netz propagieren. Allerdings stimmen die zeitlichen Muster der simulierten Verkehrsflüsse nicht immer mit den Beobachtungen überein. Diese Abweichungen werden auf die Limitierungen der Eingabedaten zum Algorithmus zur Verkehrsstärkeschätzung zurückgeführt (siehe Abschnitt 2.1.3.1). Konkret bedeutet das, der Fehler hängt von der Verortung der durchschnittlichen Geschwindigkeiten und der Anzahl der FCD-Fahrzeuge im erstellten FD ab, sowie von der Güte des geschätzten FDs

Gemäß dem erzeugten FD wird bei leicht verringerten Geschwindigkeiten im Vergleich zur Freiflussgeschwindigkeit eine erhöhte Dichte und bis zur Kapazitätsgrenze eine erhöhte

Verkehrsstärke angenommen. In der Praxis kann jedoch die Anwesenheit langsam fahrender FCD-Fahrzeuge – insbesondere von Lkws – den Durchschnitt der gemessenen Geschwindigkeit senken, ohne tatsächliche Staus zu repräsentieren. Dies führt zu einer Überschätzung der Verkehrsstärke durch das entwickelte Verfahren. Die Annahme, dass die Anzahl der FCD-Fahrzeuge als Ersatzmaß für die Verkehrsdichte verwendet werden kann, erwies sich nicht auf allen Segmenten als tragfähig. Diese Problematik zeigt sich auch in unseren FC-Daten und führt zu einer Verzerrung der geschätzten Dichte. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist in Abbildung 13 dargestellt: Dort wurde um 5 Uhr morgens eine leicht verringerte Durchschnittsgeschwindigkeit der Stichprobenfahrzeuge im Vergleich zur Freiflussgeschwindigkeit beobachtet, gepaart mit einer hohen Anzahl von FCD-Fahrzeugen, was zu einer hohen Verkehrsstärkeschätzung führte. Eine Analyse der empirischen Daten zeigte, dass ein großer Anteil (61,7 %) der Fahrzeuge in diesem Segment Lkw waren und somit nicht die allgemeine Fahrzeugverteilung auf der Straße repräsentierten (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15). Auch in anderen Studien für das Grenzgebiet Bayern-Tirol wird bestätigt, dass die Verteilung der Fahrzeugtypen in FCD eine Rolle bei der Analyse spielt (z.B.: Blumthaler et al., 2020).

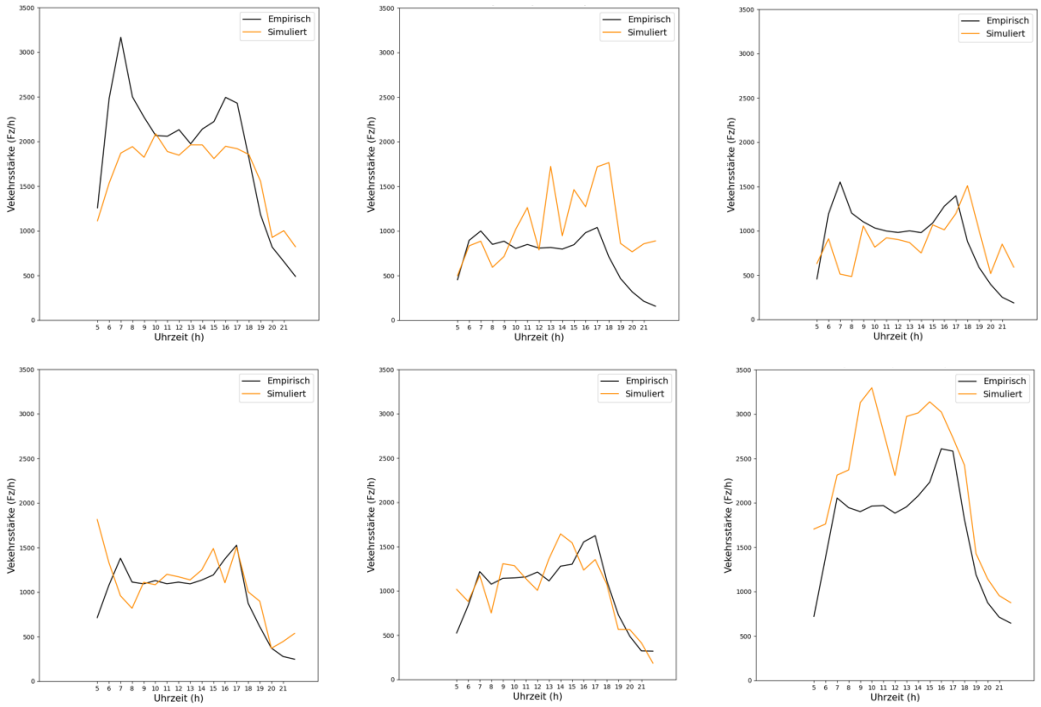

Abbildung 12: Aus der Simulation ermittelte Verkehrsstärke im Vergleich zur empirischen Verkehrsstärke aus Schleifendetektordaten

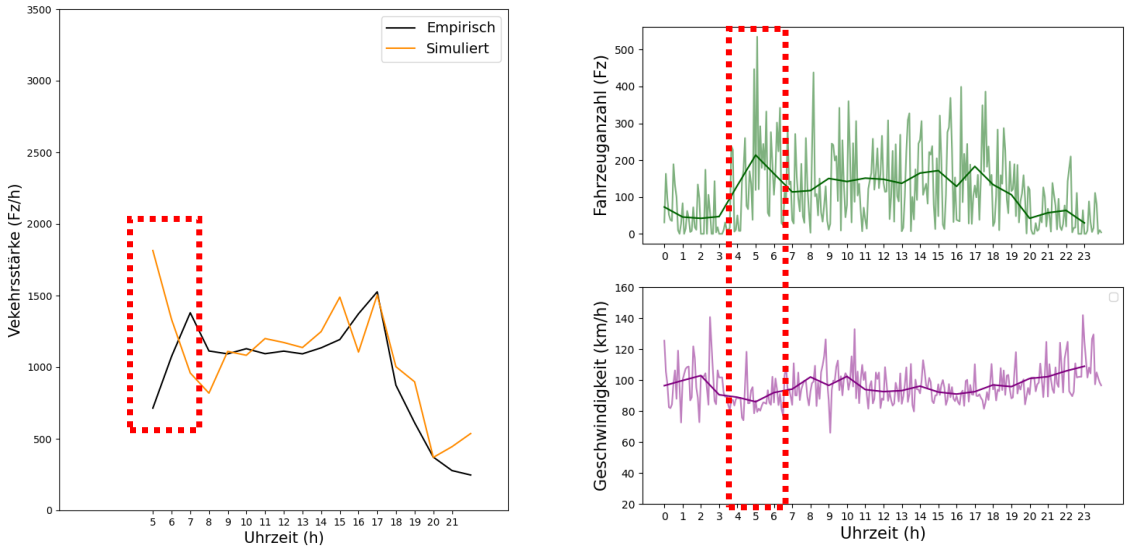

Abbildung 13: Linkes Diagramm: Aus der Simulation ermittelte Verkehrsstärke im Vergleich zur empirischen Verkehrsstärke aus Schleifendetektordaten. Rechtes oberes Diagramm: Anzahl der im Tagesverlauf auf dem Straßenabschnitt beobachteten FCD-Fahrzeuge in 5-Minuten-Intervallen und aggregiert in 1-Stunden-Intervallen. Rechtes unteres Diagramm: Durchschnittsgeschwindigkeit der im Tagesverlauf auf dem Straßenabschnitt beobachteten FCD-Fahrzeuge in 5-Minuten-Intervallen und aggregiert in 1-Stunden-Intervallen. In der Zeit zwischen 4 und 6 Uhr morgens ist die Geschwindigkeit niedriger als die Freiflussgeschwindigkeit und die Fahrzeuganzahl ist hoch, daher schätzte der Algorithmus eine sehr hohe Verkehrsstärke.

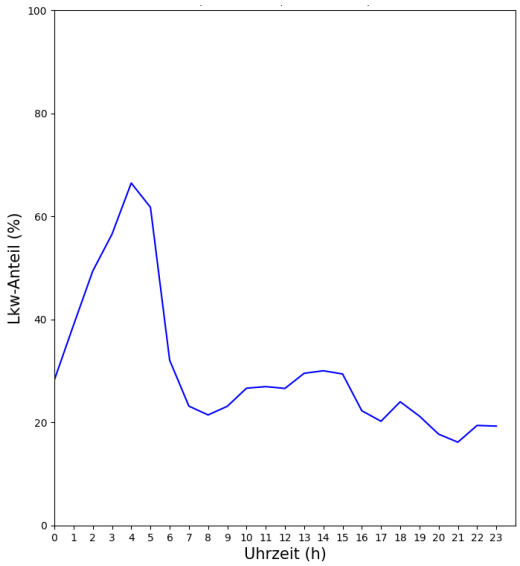

Abbildung 14: Anteil der LKW-Fahrzeuge, die tagsüber vom beobachteten Schleifendetektor erfasst werden.

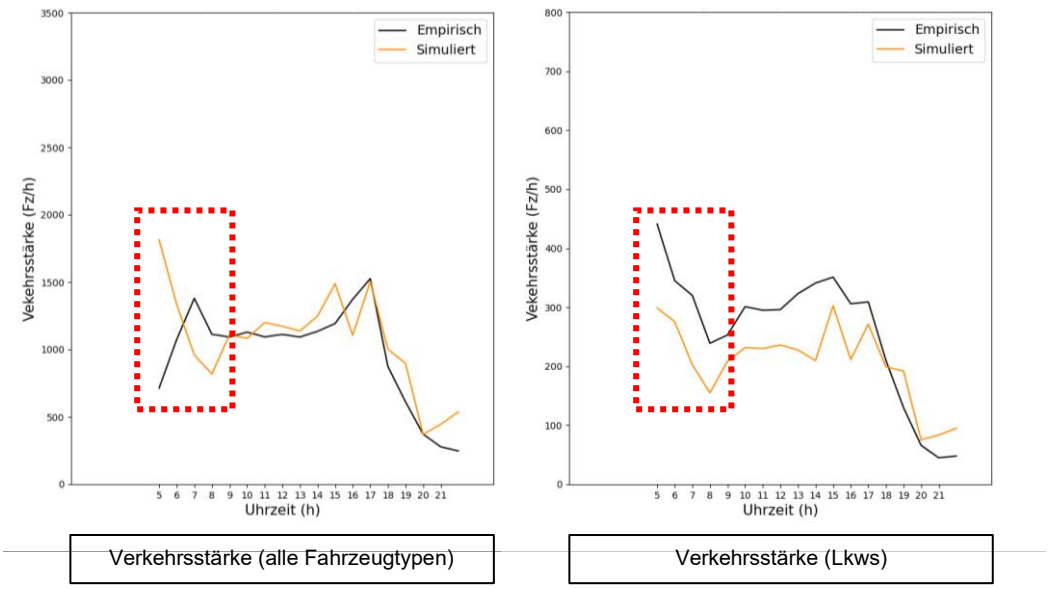

Abbildung 15: Die Kombination aus hoher Anzahl an Probefahrzeugen und niedrigen Geschwindigkeiten führte zu einem hohen Verkehrsfluss (orange, linkes Diagramm). Das resultierende Verkehrsflussprofil ähnelt dem tatsächlichen Verkehrsflussprofil von Lkw-Fahrzeugen an einer Kante über den Tag (schwarz, rechtes Diagramm).

Die Genauigkeit des FDs war ebenfalls ein entscheidender Faktor. Da das FD unter angenommenen infrastrukturellen und verkehrlichen Bedingungen erzeugt wurde, konnten reale Veränderungen, wie Fahrstreifensperrungen oder dynamische Geschwindigkeitsbegrenzungen, nicht berücksichtigt werden. Dies konnte zu einer Über- oder Unterschätzung der Kapazität führen.

Bei übergeordneten Straßen bestand das Hauptproblem darin, dass aufgrund geringerer FCD-Abdeckung weniger Straßensegmente für das Verfahren verwendet wurden. Dies führte in einigen Fällen dazu, dass keine Fahrzeugrouten durch bestimmte Netzbereiche verliefen, da dort keine Verkehrsstärkeschätzungen vorlagen. Dies unterstreicht die Bedeutung einer ausreichenden Abdeckung mit Fahrzeugzählwerten als Eingabe für die Nachfrageschätzung.

Autobahnanschlussstellen sowie Anschlussrampen auf übergeordneten Straßen wurden nicht direkt für das Verfahren verwendet, da ihre geringe FCD-Abdeckung die Fahrzeugzählungen unzuverlässig machte. Stattdessen wurden die entsprechenden, simulierten Verkehrsflüsse indirekt durch die Kalibrierung angrenzender, stromauf- und stromabwärts gelegener Segmente beeinflusst.

Die Ergebnisse der Fallstudie sind unter der MIT-Lizenz von der Plattform GitHub unter folgendem Link abrufbar: https://github.com/TUM-VT/aufgehts.

2.1.4 Diskussion der Fallstudienergebnisse

Die Ergebnisse der Fallstudie verdeutlichen sowohl das Potenzial als auch die aktuellen Einschränkungen der FCD-basierten Verkehrsstärkeschätzung und Nachfragekalibrierung. Das AUFGEHTS-Verfahren ermöglicht skalierbare Verkehrsmodellierung ohne ausschließliche Abhängigkeit von stationärer Sensorinfrastruktur, seine Leistungsfähigkeit hängt jedoch maßgeblich von der Repräsentativität und dem Detailreichtum der FCD ab.

Eine zentrale Annahme des Schätzalgorithmus besteht darin, dass niedrigere Geschwindigkeiten auf eine höhere Verkehrsdichte hinweisen, im Sinne eines FDs. In der Praxis wird diese Annahme jedoch durch die Heterogenität der Fahrzeugflotte erschwert. Lkw, die auch bei freiem Verkehrsfluss langsamer als Pkw fahren, sind in FCD-Datensätzen häufig überrepräsentiert – besonders auf Autobahnen, wie auch durch Schleifendetektordaten im Untersuchungsgebiet bestätigt wurde. Dies führt zu einer systematischen Verringerung der durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeiten auf entsprechenden Straßensegmenten und somit zu einer erhöhten Dichte- und verfälschten Verkehrsstärkeschätzung.

Dieses Problem wird dadurch verschärft, dass FCD in aggregierter Form keine Informationen zu Fahrzeugtypen oder fahrstreifenspezifischem Fahrverhalten enthält. Ohne Kenntnis darüber, ob eine niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit durch tatsächliche Staus oder lediglich durch Fahrzeugklassen mit niedriger Freiflussgeschwindigkeit (z.B. Lkw) verursacht wurde, lässt sich der Verkehrszustand nur erschwert interpretieren. Zudem verbergen aggregierte Daten Unterschiede zwischen Fahrstreifen – etwa zwischen Pkw- und Lkw-Spuren oder bei Auffahrten und Abfahrten –, was die Fähigkeit der Methode einschränkt, echte Netzdynamiken zu erfassen. Am Markt existieren auch Angebote zu FCD in höherer Auflösung, beispielsweise in Form detaillierter Fahrzeugtrajektorien. Solche Datenformate könnten eine Differenzierung nach Fahrzeugtyp, eine präzisere Geschwindigkeitszuordnung sowie eine bessere Filterung von Ausreißern und Anomalien ermöglichen. Dies kann somit auch in einer höheren Modellqualität bei Anwendung des AUFGEHTS-Verfahrens führen.

Ein weiterer zentraler Schwachpunkt in den Daten ist die Variabilität des Durchdringungsgrades von FCD-Fahrzeugen im gesamten Verkehrsfluss. Auch die absolute Anzahl an FCD-Fahrzeugen pro Geschwindigkeitsmessung schwankt sowohl räumlich im Netz als auch zeitlich über den Tagesverlauf. Da die Verkehrsstärkeschätzung auf der Annahme basiert, dass die Anzahl der FCD-Fahrzeuge als Ersatzmaß für die Verkehrsdichte dient, führt ein instabiler Durchdringungsgrad zu erheblichem Rauschen in den Ergebnissen. Geringe oder stark schwankende Stichprobengrößen beeinträchtigen die Zuverlässigkeit der Schätzwerte und damit auch die Genauigkeit der nachgelagerten Nachfrageschätzung.

Eine weitere potenzielle Fehlerquelle liegt in der Erstellung synthetischer FDs. Das Verfahren geht davon aus, dass das synthetische FD zu einer realistischen Netzkapazität führt – unter Berücksichtigung von Fahrstreifenzahl und Geschwindigkeitsbegrenzungen. Reale Bedingungen – wie polizeiliche Verkehrsmaßnahmen, temporäre Fahrbahnsperrungen oder dynamische Geschwindigkeitsbegrenzungen – können jedoch die tatsächliche Kapazität deutlich reduzieren. Entsprechende Informationen waren in diesem Projekt nicht verfügbar. Wenn diese Faktoren im Netzmodell nicht berücksichtigt sind, fällt das FD zu optimistisch aus.

Dies kann später zu Fehlinterpretationen führen, etwa wenn niedrige beobachtete Geschwindigkeiten einem FD mit überhöhter Kapazität gegenübergestellt werden, was zu verzerrten Verkehrszustandsschätzungen führt. Um die Genauigkeit zu vergrößern, muss das simulierte FD reale Bedingungen wie variable Tempolimits oder Sperrungen möglichst gut approximieren. Abweichungen zwischen simulierter und realer Infrastruktur beeinträchtigen die Gültigkeit der Verkehrsstärkeschätzungen und wirken sich negativ auf die Kalibrierung aus.

Diese Herausforderungen zeigen, dass die Aussagekraft FCD-basierter Modellierung stark von der Qualität der Eingangsdaten sowie von der korrekten Abbildung der strukturellen Eigenschaften des Netzes abhängt. Trotz dieser Einschränkungen zeigt die Methode ein vielversprechendes Potenzial – insbesondere in Regionen mit geringer Abdeckung mit Schleifendetektoren. Die Fähigkeit, Nachfragemuster ausschließlich aus FCD zu schätzen und zu kalibrieren, ist besonders wertvoll für grenzüberschreitende Korridore und ländliche Gebiete, in denen Schleifendetektoren fehlen. Um jedoch Simulationsqualität auf Planungsniveau zu erreichen, sind Datenformate mit höherer Granularität und möglicherweise die Integration trajektorienbasierter FCD erforderlich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass FCD ein leistungsfähiger Ersatz oder eine sinnvolle Ergänzung zu traditionellen Verkehrsdaten sein kann. Ihr Einsatz in der Nachfrageschätzung erfordert jedoch einen sorgfältigen Umgang mit Verzerrungen, Annahmen und Datenbeschränkungen. Die derzeitige Umsetzung funktioniert am besten dort, wo die FCD-Abdeckung hoch und die Fahrzeugzusammensetzung stabil ist. Die Erweiterung der Robustheit der Methode hängt künftig von der Verfügbarkeit hochauflösender FCD sowie der Entwicklung von Techniken zur Unterscheidung zwischen Stau und anderen Ursachen für Geschwindigkeitsreduktionen im Datensatz ab.

2.1.5 Ergebnisse aus dem Abschlussworkshop

Am 23. Januar 2025 wurde ein Workshop durchgeführt, um das AUFGEHTS-Verfahren und dessen Anwendbarkeit in der Praxis zu beleuchten. Die Veranstaltung fand online statt und die Teilnehmenden waren sowohl Ingenieurbüros als auch Verkehrsbehörden aus Deutschland, der Schweiz und Österreich zuzuordnen. Im Rahmen des Workshops wurde das im Projekt AUFGEHTS entwickelte Verfahren einem breiten Fachpublikum vorgestellt, potenzielle Anwendungsfelder wurden diskutiert und gezielt Feedback eingeholt. Ziel der Veranstaltung war es, die Teilnehmenden über interaktive Umfragen aktiv einzubinden, um Perspektiven zu Herausforderungen, Zielsetzungen und zukünftige Forschungsrichtungen im Bereich mesoskopischer Verkehrssimulationen zu sammeln. Dieses Feedback wurde als entscheidend für die Bewertung der Anwendbarkeit und Übertragbarkeit der entwickelten Methodik auf reale Planungsprozesse sowie für die Ableitung möglicher zukünftiger Forschungsthemen betrachtet.

Ein zentrales Ergebnis des Workshops waren die identifizierten Herausforderungen für die Verkehrsmodellierung und -simulation der Zukunft. Eine „Wortwolke“ zeigte eine Vielzahl wiederkehrender Schlagworte (siehe Abbildung 16). Besonders häufig genannt wurden „Kosten“, „Kalibrierung“, „Echtzeit“, „Datenverfügbarkeit“ und „Verlässlichkeit“. Auch Begriffe wie „Aktualität“, „Big Data“ und „Standardisierung“ wurden mehrfach genannt. Diese Schwerpunkte deuten auf einen dringenden Bedarf hin, die grundlegenden Anforderungen an Datenverfügbarkeit, Systemzuverlässigkeit und Echtzeitfähigkeit zu adressieren sowie gleichzeitig die Standardisierung und Zugänglichkeit zentraler Eingabedaten zu verbessern. Es wurde somit bestätigt, dass die durch AUFGEHTS adressierten Themen nach wie vor eine hohe Relevanz für die Praxis aufweisen.

Abbildung 16: Wortwolkenergebnisse zur Frage nach Herausforderungen in der Verkehrsmodellierung und -simulation.

In einer weiteren Frage wurden die Teilnehmenden gebeten, zentrale Projektziele zu priorisieren. An erster Stelle stand dabei die Kalibrierung von Modellen, gefolgt von der Möglichkeit, Modelle einfach zu aktualisieren und auf andere Kontexte zu übertragen (siehe Abbildung 17). Auch die Qualität der verwendeten Verfahren wurde hoch gewichtet, ebenso wie die generelle Bereitstellung und Erstellung von Modellen. Bemerkenswert ist, dass die Kosten – obwohl zuvor häufig als Herausforderung genannt – in der Priorisierung nachrangig bewertet wurden. Dies deutet darauf hin, dass die Teilnehmenden zwar finanzielle Aspekte wahrnehmen, der Fokus jedoch klar auf technischer und methodischer Leistungsfähigkeit liegt.

Abbildung 17: Ergebnisse auf die Frage, welche Ziele des AUFGEHTS-Projektes die wichtigsten sind

In Bezug auf den Projektansatz selbst äußerten sich die Teilnehmenden ebenfalls konstruktiv. Es wurden verschiedene Herausforderungen identifiziert, etwa die Übertragbarkeit auf andere Anwendungen, die Repräsentativität und Qualität der verwendeten FCD sowie die generelle Aussagekraft der Simulationen. Die Datengrundlage und die Qualität der Eingangsdaten wurden mehrfach thematisiert, ebenso wie die Frage, ob die Verkehrsmittelwahl im Ansatz

ausreichend berücksichtigt wird. Zudem bestand Skepsis hinsichtlich der Anwendung im urbanen Raum, welcher durch hohe Komplexität und dynamische Verkehrsflüsse gekennzeichnet ist.

Mit Blick auf zukünftige Forschungsschwerpunkte nannten die Teilnehmenden zahlreiche Richtungen, in die weitere Entwicklungsarbeit fließen sollte. Besonders betont wurde der Einsatz von Maschinenlernen zur Kalibrierung. Auch die Datenfusion – also die Kombination von FCD mit Zähldaten oder Trackingdaten – wurde als vielversprechend hervorgehoben. Maßnahmen zur Datenbereinigung und automatisierten Datenverarbeitung wurden ebenso gefordert wie automatische Aktualisierungen. Zudem wurde die Rolle einer feineren Differenzierung zwischen Lkw- und Pkw-Daten in den FCD-Datensätzen für eine höhere Modellgenauigkeit betont.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Workshop eine deutliche Übereinstimmung hinsichtlich mehrerer Kernthemen offenbarte: die Notwendigkeit robuster und adaptiver Kalibrierungsverfahren, die zentrale Rolle hochwertiger, repräsentativer Daten (insbesondere Echtzeitdaten) sowie die Forderung nach skalierbaren, übertragbaren Simulationsmodellen. Diese Erkenntnisse spiegeln nicht nur die aktuellen Herausforderungen in der Verkehrsmodellierung wider, sondern liefern auch konkrete Anhaltspunkte für die Weiterentwicklung des AUFGEHTS-Ansatzes und vergleichbarer Initiativen.

2.1.6 Fazit

Dieses Projekt hatte zum Ziel, ein skalierbares, automatisiertes und kosteneffizientes Verfahren zur Erstellung und Kalibrierung mesoskopischer Verkehrssimulationsmodelle auf Basis von FCD und offenen Geodaten zu entwickeln und zu validieren. Die Methodik adressierte zentrale Schwächen der derzeitigen Praxis in der Verkehrsmodellierung: den zeitintensiven manuellen Aufbau von Simulationsnetzen, die Abhängigkeit von fragmentierten Sensordaten sowie die fehlende Unterstützung grenzüberschreitender Modellierung.

Der vorgeschlagene Ansatz wurde im Korridor A93/A12 zwischen Bayern und Tirol getestet – einer Region mit hohem Verkehrsaufkommen. Das entwickelte Verfahren basiert auf der Open-Source-Simulationssoftware SUMO und beinhaltete mehrere Elemente, darunter die automatisierte Netzerstellung aus OSM, die Integration von FCD zur Verbesserung von Netzattributen, ein FD-basierter Verkehrsstärkeschätzalgorithmus sowie die Anwendung von Transcalitys endogener Nachfrageschätzungsmethodik in einer neuen Datenumgebung.

In Bezug auf die ursprünglichen Projektziele und Forschungsfragen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Die (hoch-)automatisierte Netzerstellung mithilfe von OSM wurde erfolgreich umgesetzt, wodurch das detaillierte Simulationsnetz mit minimalem manuellem Aufwand und dementsprechend geringen Kosten erstellt werden konnte. Dabei werden auch weitere, amtliche Geodaten integriert (z.B.: Positionen der Schleifendetektoren).
- Die Integration von FCD erfolgte in mehreren Verfahrensstufen, einschließlich der Korrektur der Geschwindigkeitsattribute im Netz sowie der Schätzung der Verkehrsstärke.
- Die Kalibrierung und endogene Nachfrageschätzung basierend auf FCD-Verkehrsstärkeschätzungen konnte erfolgreich implementiert werden. Die ursprünglich für Schleifendetektordaten entwickelte Methode wurde so auf eine flexiblere Datenbasis erweitert.
- Die grenzüberschreitende Anwendbarkeit wurde im Rahmen der Fallstudie erfolgreich demonstriert.
- Übertragbarkeit und minimale Datenanforderungen konnten bestätigt werden, da sich das Verfahren primär auf offene und kommerziell zugängliche Datenquellen basierend auf gängigen Datenstandards stützt.
- Die Modellqualität lässt sich entsprechend der FGSV-Normen anhand der GEH-Statistik bewerten. Das rein auf FCD basierende AUFGEHTS-Verfahren erreichte für den ausgewählten Testfall jedoch nicht vollständig den FGSV-Standard für ein „sehr gut“ kalibriertes Modell. In einer eingehenden Analyse wurden mögliche Gründe dafür identifiziert, was zugleich vielversprechende Bereiche für zukünftige Forschungsprojekte aufdeckte. Zudem eignet sich das erstellte Simulationsmodell für eine weitergehende Vertiefung und Verfeinerung, und trägt somit als Basis zu einer niederschwelligen, simulationsgestützten Verkehrsplanung bei.
- Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades und der Verwendung offener Daten und Software, können kompetitive Preise für die erstellten Simulationsmodelle angeboten werden.
- Die Zeiteffizienz des Verfahrens wurde belegt: Der vollständige Prozess – von der Datenaufnahme bis zur kalibrierten Simulation – kann in weniger als einem Tag abgeschlossen werden (abhängig von der Einbeziehung niederklassiger Straßen), was das Potenzial für eine rasche Umsetzung unterstreicht.

Diese Ergebnisse zeigen, dass das AUFGEHTS-Verfahren eine praxistaugliche Grundlage für die Erstellung kalibrierter Verkehrsmodelle in Gebieten mit wenigen Verkehrssensoren und verwaltungstechnisch komplexen Kontexten bietet. Das Verfahren ist schnell, weitgehend

automatisiert und eignet sich insbesondere für explorative Planungszwecke, Machbarkeitsstudien oder den Ausbau der Modellierungskapazitäten in unterversorgten Regionen. Gleichzeitig bleibt die Methode stark von der Stabilität und Repräsentativität der verwendeten FCD abhängig – insbesondere dann, wenn diese als alleinige Kalibrierungsquelle eingesetzt wird.

2.1.7 Zukünftige Arbeit

Mehrere Ansatzpunkte zur Verbesserung und Weiterentwicklung des Verfahrens wurden identifiziert:

- Erstens würde die Integration von trajektorienbasierten FCD eine Identifikation von Fahrzeugtypen ermöglichen und die Interpretation von Geschwindigkeitsdaten verbessern. Dadurch könnte die Verzerrung durch langsam fahrende Fahrzeuge reduziert werden, wenn das Verfahren entsprechend angepasst würde.
- Zweitens könnte die Erstellung von FDs durch die dynamische Berücksichtigung realer Einflüsse wie Fahrstreifensperrungen, variabler Geschwindigkeitsbegrenzungen und Wetterbedingungen verbessert werden – Faktoren, die im aktuellen, statischen Modell nicht erfasst werden.
- Drittens könnten fortgeschrittene Methoden zur Handhabung variabler FCD-Durchdringungsgrade untersucht werden, z. B. durch Normalisierung auf Basis bekannter Fahrzeugpopulationen oder durch hybride Kalibrierungsansätze, die FCD mit spärlich vorhandenen Sensordaten kombinieren.

Zusammenfassend bietet das AUFGEHTS-Verfahren eine flexible und effiziente Art und Weise, um Verkehrssimulationen in datenlimitierten Umgebungen zu erstellen. Mit weiteren Verfeinerungen in der Datenverarbeitung und Kalibrierungslogik besitzt sie das Potenzial, schnelle, kosteneffiziente und qualitativ hochwertige Verkehrsmodellierung in einer Vielzahl von Planungsanwendungen zu unterstützen.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

2.2.1 Transcality

Das Projektbudget von AUFGEHTS wurde auf mehrere zentrale Kostenkategorien verteilt, die jeweils direkt zur Erreichung der Projektziele und zur Erbringung der Ergebnisse beitrugen:

- **Personalkosten:** Der größte Anteil des Budgets entfiel auf Personalkosten. Dazu zählten Gehälter für Forschungs- und Entwicklungspersonal, das für die Umsetzung der technischen Arbeitspakete verantwortlich war. Zudem umfassten die Personalkosten Aktivitäten wie die Abstimmung mit Stakeholdern sowie Maßnahmen zur Ergebnisverbreitung.
- **Datenbeschaffung:** Ein bedeutender Teil des Budgets wurde für den Erwerb kommerzieller FCD aufgewendet. Angesichts der zentralen Rolle von FCD im Modellierungs- und Kalibrierungsprozess war eine ausreichende Abdeckung und Qualität der Daten im Untersuchungsgebiet entscheidend für den Projekterfolg.
- **Reisen und Besprechungen:** Reisekosten entstanden in erster Linie durch die Projektkoordination sowie die Teilnahme an relevanten Fachveranstaltungen (z. B. Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2024). Diese Aktivitäten waren unerlässlich für den Zugang zu Daten, die Validierung der Projektergebnisse durch externe Fachleute und die Verbreitung der Resultate.

2.2.2 TUM-VT

- **Personalkosten:** Der größte Teil des Budgets wurde für Personalkosten verwendet. Diese dienten der Finanzierung eines Mitarbeiters am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, der für die Umsetzung spezifischer Arbeitspakete im Projekt verantwortlich war. Zu seinen Aufgaben gehörten außerdem die Koordination mit relevanten Akteuren zur Beschaffung grenzüberschreitender Daten, die wissenschaftliche Unterstützung sowie Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse.
- **Reisen und Besprechungen:** Reisekosten entstanden durch die Teilnahme an einer hochkarätigen Fachveranstaltung – der gemeinsamen Konferenz von TRC-30 und MFTS in Heraklion, Griechenland. Ziel der Teilnahme und Präsentation war es, die Bedeutung der Zielsetzung von AUFGEHTS der wissenschaftlichen Gemeinschaft zu vermitteln, Projektergebnisse zu verbreiten und wertvolles Feedback zu erhalten.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Projekts AUFGEHTS durchgeführten Aktivitäten waren notwendig, um eine klar definierte Lücke in der aktuellen Praxis der Verkehrssimulation und -planung zu schließen. Obwohl Verkehrssimulationen ein zentrales Instrument zur Bewertung von Infrastruktur- und Maßnahmenwirkungen darstellen, erfordern die Erstellung und Kalibrierung von Simulationsmodellen traditionell erheblichen manuellen Aufwand, umfangreiche Datenverfügbarkeit sowie spezialisiertes Fachwissen – Faktoren, die insbesondere kleinere Kommunen und grenzüberschreitende Regionen an der Nutzung solcher Modelle hindern. Dies führt zu einer Unterausnutzung von Verkehrssimulationen in der Verkehrsplanung.

Die Entwicklung eines automatisierten, skalierbaren und kosteneffizienten Verfahrens zur Modellerstellung und -kalibrierung, wie sie im Projekt AUFGEHTS verfolgt wurde, stellt eine direkte Antwort auf diese Herausforderungen dar. Der Fokus des Projekts auf den Einsatz von FCD und offenen Geodaten (z. B. OSM) steht im Einklang mit übergeordneten politischen Zielen, die auf Digitalisierung, die Nutzung offener Daten in der Verkehrsplanung abzielen.

Umfang und Ausgestaltung der Projektarbeit waren angemessen und zielgerichtet in Bezug auf die gesetzten Ziele. Die Projektressourcen konzentrierten sich im Rahmen der Machbarkeitsanalyse auf essenzielle Bereiche für die Entwicklung einer funktionsfähigen und übertragbaren Lösung: Integration von Datenquellen, algorithmische Entwicklung, Automatisierung der Simulationsprozesse sowie robuste Validierung nach anerkannten Standards des Verkehrswesens (z. B. FGSV-Richtlinien). Ergänzende Aktivitäten wie Stakeholder-Einbindung, Öffentlichkeitsarbeit und Workshop-Organisation wurden auf das erforderliche Maß beschränkt, um die technische Entwicklung zu unterstützen und die Anwendung in der Praxis zu fördern.

Sowohl für Transcality als Startup als auch für TUM-VT als Lehrstuhl der Technischen Universität Münchens sind solche Forschungsaktivitäten ohne Förderprogramme wie das mFUND nicht möglich. Insgesamt war die geleistete Arbeit notwendig und angemessen für das Erreichen der Projektziele. Die Kosten waren notwendig und es wurde wirtschaftlich und sparsam verfahren.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen

Die im Projekt AUFGEHTS erzielten Ergebnisse bieten bedeutende und vielfältige Nutzenpotenziale auf mehreren Ebenen:

Praktischer und strategischer Nutzen

Aus praktischer Sicht senkt das entwickelte Verfahren die Einstiegshürden für eine simulationsgestützte Verkehrsplanung erheblich. Regionale Behörden, Kommunen und kleinere Ingenieurbüros – Akteure, die bisher aufgrund hoher Modellierungskosten und personeller Anforderungen von der Nutzung solcher Werkzeuge ausgeschlossen waren – erhalten mit AUFGEHTS einen niederschwelligen Zugang zu einer realisierbaren Alternative. Besonders in grenzüberschreitenden Verkehrskorridoren sowie in Regionen mit begrenzter konventioneller Verkehrserfassung, bei denen die Datenerhebung aufwendig und kostenintensiv ist, stellt die Methode eine robuste Grundlage für konsistente, datenbasierte Planung und Entscheidungsfindung dar.

Darüber hinaus unterstützt der Fokus auf Automatisierung und Kosteneffizienz die übergeordneten Digitalisierungsziele der öffentlichen Verwaltung und steht im Einklang mit nationalen und europäischen verkehrspolitischen Zielsetzungen.

Verwertungsstrategie

Die Transcality AG verfolgt die Verwertung der Projektergebnisse aktiv. Durch die Integration des entwickelten AUFGEHTS-Verfahrens und Transcalitys Standardverfahren, kann jenes für Kunden mit FCD angewendet werden. Laufende Marketing- und Vertriebsaktivitäten testen bereits die Markt-Hypothese, dass ein starker Bedarf für skalierbare, automatisierte Modellgenerierung und -kalibrierung in der kommunalen, regionalen und grenzüberschreitenden Verkehrsplanung besteht. Diese Aktivitäten beziehen sich auf Kommunen zwischen 20.000 und 500.000 Einwohnern in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Weitere Treffen mit den im Projekt beteiligten externen Akteuren sind in Planung, um den Anwendungsfall der grenzüberschreitenden Verkehrsplanung noch weiter zu vertiefen.

Bedarf an weiterer Forschung und Entwicklung

Obwohl das Projekt die grundsätzliche Machbarkeit FCD-basierter Simulationsmodellerstellung und -kalibrierung demonstrieren konnte, ist weitere Forschung erforderlich, um die Kalibrierungsqualität auf ein Niveau zu heben, das eine belastbare Anwendung für weiterführende Planungs- und Betriebsaufgaben ausschließlich auf FCD-Basis erlaubt. Zu den vorrangigen Forschungsthemen zählen die Erhöhung der Robustheit gegenüber variierenden Datenbedingungen, die Weiterentwicklung der Nachfrageschätzverfahren und die Ausweitung auf multimodale Simulationen.

Das Projekt hat in diesem Zusammenhang auch eine tragfähige Grundlage für die Fortführung akademischer Zusammenarbeit geschaffen – insbesondere mit dem TUM-VT. Gemeinsame Forschungsvorhaben sind vorgesehen, um die AUFGEHTS-Methodik weiterzuentwickeln, wissenschaftliche Fortschritte in der automatisierten Verkehrsmodellierung zu leisten und Echtzeit-Updates für digitale Zwillinge zu ermöglichen. Die Förderlandschaft wird konstant beobachtet, um möglichen Chancen für ein Nachfolgeprojekt zu identifizieren.

Gesamtfazit

Die Projektergebnisse von AUFGEHTS leisten einen wertvollen Beitrag zur praktischen Innovation im Mobilitätssektor und zur Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Forschung im Bereich datengetriebener, automatisierter Simulationsprozesse. Das Verfahren vereint Skalierbarkeit, Effizienz und die niederschwellige Anwendung und adressiert damit zentrale Herausforderungen der simulationsgestützten Verkehrsplanung.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Verlauf des AUFGEHTS-Projekts wurden mehrere bedeutende Entwicklungen in den Bereichen Simulationsmodellierung und digitale Zwillinge beobachtet.

PTV stellte PTV Flows vor, eine Plattform zur Echtzeit-Verkehrsüberwachung auf Basis von FCD, und lancierte PTV Model2Go, einen Dienst zur schnellen Erstellung von Verkehrsmodellen. Während diese Produkte wichtige Schritte in Richtung Automatisierung und Zugänglichkeit darstellen, konzentrieren sie sich hauptsächlich entweder auf Monitoring (PTV Flows) oder auf makroskopische Netzerstellung (PTV Model2Go mit PTV Visum im Hintergrund), ohne eine vollständige mesoskopische Simulationskalibrierung mit grenzüberschreitender Datenfusion zu integrieren. Nichtsdestotrotz bestätigen diese Entwicklungen die Relevanz des Themas für die Praxis.

Im weiteren Technologiesektor hat Google Research erste Arbeiten zu digitalen Verkehrszwillingen initiiert, insbesondere mit KI-basierten Methoden zur Modellierung urbaner Mobilitätssysteme. Diese Entwicklungen spiegeln die zunehmende strategische Aufmerksamkeit für datengetriebene, skalierbare Modellierung von Verkehrsnetzen wider.

Nach unserem Kenntnisstand hat während der Projektlaufzeit keine Initiative ein skalierbares Verfahren zur Erstellung und Kalibrierung mesoskopischer Verkehrssimulationsmodelle realisiert, das OSM, offizielle Verkehrsdaten und kommerzielle FCD integriert – mit besonderem Fokus auf grenzüberschreitende Anwendbarkeit. Das AUFGEHTS-Projekt bleibt daher hoch relevant und stellt eine komplementäre Ergänzung zu den zuvor genannten externen Entwicklungen dar.

Die im Projekt beobachteten externen Entwicklungen bestätigen sowohl die Aktualität von AUFGEHTS als auch die Bedeutung weiterer Innovationen in diesem sich rasch entwickelnden Bereich.

2.6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Das AUFGEHTS-Projekt führte mehrere Verbreitungsaktivitäten durch, um das entwickelte Verfahren bekannt zu machen und den Austausch mit Akteuren aus Forschung, Praxis und öffentlicher Verwaltung zu fördern.

- **Konferenzbeitrag:** Zentrale Projektergebnisse wurden auf dem DSVK 2024 der FGSV vorgestellt. Die Präsentation fand in Form einer Postersession statt und brachte das entwickelte Verfahren einem breiten Publikum aus Verkehrsingenieurwesen, Planung und Forschung näher. Das dort erhaltene Feedback bestätigte die praktische Relevanz der Methode und floss in deren Weiterentwicklung ein.
- **Stakeholder-Workshop:** Zu Beginn des Jahres 2025 wurde ein Workshop mit regionalen Stakeholdern, darunter Mitarbeitende öffentlicher Verwaltungen und Ingenieurbüros, organisiert. Im Mittelpunkt standen die Demonstration des Verfahrens, die Diskussion praktischer Anwendungsfälle sowie die strukturierte Sammlung von Rückmeldungen zur Nutzbarkeit und zum Anwendungspotenzial des Verfahrens in realen Projekten.
- **Geplante wissenschaftliche Publikation:** Ein Fachartikel auf Basis der AUFGEHTS-Ergebnisse befindet sich derzeit in Vorbereitung und soll bei der Fachzeitschrift „Straßenverkehrstechnik“ eingereicht werden. Die Veröffentlichung wird die methodischen Neuerungen, und Validierungsergebnisse detailliert darstellen. Die Publikation soll die Sichtbarkeit der Projektergebnisse in der wissenschaftlichen und praktischen Fachgemeinschaft weiter erhöhen.

2.7 Literaturverweise

Anuar, K., Habtemichael, F., & Cetin, M. (2015). *Estimating traffic flow rate on freeways from probe vehicle data and fundamental diagram.* In **2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)** (pp. 2921–2926). IEEE. https://doi.org/10.1109/ITSC.2015.468

Blumthaler, W., Bursa, B., & Mailer, M. (2020). Influence of floating car data quality on congestion identification. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 20(4), 22–37. https://doi.org/10.18757/ejtir.2020.20.4.5304

Brackstone, M., Montanino, M., Daamen, W., Buisson, C., & Punzo, V. (2012, January). *Use, calibration, and validation of traffic simulation models in practice: results of Web-based survey.* In **TRB 2012 - Transportation Research Board 91st Annual Meeting** (pp. 12–p). Transportation Research Board.

Cascetta, E. (1984). *Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: A generalized least squares estimator.* Transportation Research Part B: Methodological, 18(4–5), 289–299. https://doi.org/10.1016/0191-2615(84)90025-7

Ceccato, R., Gecchele, G., Rossi, R., & Gastaldi, M. (2022). *Cost-effectiveness analysis of origin-destination matrices estimation using floating car data: Experimental results from two real cases.* Transportation Research Procedia, 62, 541–548. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.02.067

Daganzo, C. F. (1997). *Fundamentals of transportation and traffic operations.* Pergamon.

FGSV. (2008). *Richtlinien für integrierte Netzplanung.* Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Deutschland.

FGSV. (2015). *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen.* Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Deutschland.

Hale, D. K., Antoniou, C., Brackstone, M., Michalaka, D., Moreno, A. T., & Parikh, K. (2015). *Optimization-based assisted calibration of traffic simulation models.* Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 55, 100–115. https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.011

Han, Y., Zhang, M., Guo, Y., & Zhang, L. (2022). *A streaming-data-driven method for freeway traffic state estimation using probe vehicle trajectory data.* Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 606, 128045. https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.128045

Mahajan, V., Cantelmo, G., Rothfeld, R., & Antoniou, C. (2023). *Predicting network flows from speeds using open data and transfer learning.* IET Intelligent Transport Systems, 17(4), 804–824. https://doi.org/10.1049/itr2.12305

Mitra, A., Attanasi, A., Meschini, L., & Gentile, G. (2020). *Methodology for O-D matrix estimation using the revealed paths of floating car data on large-scale networks.* IET Intelligent Transport Systems, 14(12), 1704–1711. https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0684

Osorio, C. (2019). *Dynamic origin-destination matrix calibration for large-scale network simulators.* Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 98, 186–206. https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.09.023

Seo, T., & Kusakabe, T. (2015). *Probe vehicle-based traffic flow estimation method without fundamental diagram.* Transportation Research Procedia, 9, 149–163. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.07.009