Schlussbericht HAIBrid

Hybrid AI towards Large Scale Data and Behavior Modeling for Automated Driving

Version: 1.1

Veröffentlichung: 07.08.2025

Dr.-Ing. Ömer Sahin Tas
FZI Forschungszentrum Informatik

Zuwendungsempfänger: FZI Forschungszentrum Informatik	**Förderkennzeichen:** 01IS21096D
Vorhabenbezeichnung: Hybrid AI towards Large Scale Data and Behavior Modeling for Automated Driving (HAIBrid)	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2021-30.09.2024	
Berichtszeitraum: 01.11.2022-30.09.2024	

„Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS21096D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Inhalt

1 Einleitung und Projektziel 2
2 Ausgangslage 3
3 Projektverlauf und durchgeführte Arbeiten 4
4 Ergebnisse und Zielerreichung 5
5 Vergleich zur Vorhabenbeschreibung 10
6 Verwertungsperspektiven und Planung 11
7 Externer Fortschritt im Themenfeld während der Projektlaufzeit 13
8 Veröffentlichungen 14

1 Einleitung und Projektziel

Das Verbundvorhaben HAIBrid – Hybride KI zur Daten- und Verhaltensmodellierung in großem Maßstab für automatisiertes Fahren verknüpft die Expertise von fünf Partnern aus Forschung und Industrie, um datengetriebene Grundlagen für kooperatives, menschenähnliches Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge zu schaffen. Unter der deutschen Koordination des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der französischen Leitung des Center for Robotics an MINES ParisTech (Armines) entwickelt das Konsortium Methoden, mit denen großvolumige Kamera- und LiDAR-Aufnahmen in präzise Trajektoriensätze, semantisch reichhaltige 3D-Karten und belastbare Interaktionsmodelle überführt werden können. Valeo bringt dabei sein Know-how in der kamerabasierten Umfelderfassung ein, während das Karlsruher Start-up SafeAD auf die Automatisierung der HD-Kartierung fokussiert. Übergeordnetes Ziel des gemeinsamen deutsch-französischen Projekts ist es, die bislang aufwendig manuelle Datengrundlage für Bewegungsvorhersage und Entscheidungsalgorithmen durch hybride KI-Verfahren weitgehend selbsttätig zu erzeugen und als offene Ressourcen für Forschung und Industrie bereitzustellen.

Innerhalb dieses Verbundes verantwortet das FZI die robuste Datenakquisition in Karlsruhe, die präzise Fusion und Aufbereitung der Rohdaten zu vollattribuierten Trajektorien sowie die halbautomatische Erstellung einer hochaufgelösten Lanelet2-Referenzkarte. Diese Arbeiten bilden das Rückgrat von WP1, in dessen Rahmen das FZI eng mit dem KIT als Sensorfahrzeug-betreiber kooperiert; die erzeugten Datenstrukturen werden in WP2 sowohl in die unüberwachten Lernverfahren von Armines als auch in die Validierung der Machine-Learning-Methoden für das kamerabasierte HD-Mapping von SafeAD eingespeist . Die verifizierten Trajektorien und Karten fungieren darüber hinaus als Ground-Truth für die vom KIT geleitete WP3-Verhaltensmodellierung, auf deren Basis Detektions- und Vorhersagemodelle evaluiert werden . Damit stellt das FZI einen konsistenten, qualitativ hochwertigen Daten- und Kartenkern bereit, ohne den die nachgelagerten KI-Module des Konsortiums weder effizient trainiert noch belastbar bewertet werden könnten.

2 Ausgangslage

Das Projekt HAIBrid startete im Oktober 2021 mit dem Ziel, hybride KI-Verfahren zur Analyse und Annotation großskaliger Verkehrsdaten für das automatisierte Fahren zu entwickeln. In der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung war die Atlatec GmbH als Industriepartner für die Erstellung präziser, semantisch annotierter Karten im Lanelet2-Format und für Beiträge zur Datenverarbeitung vorgesehen. Im Laufe des ersten Projektjahres verließ Atlatec das Konsortium. Um die betroffenen Aufgabenbereiche vollumfänglich fortzuführen, traten zum Ende des Jahres 2022 zwei neue Partner dem Projekt bei: das FZI Forschungszentrum Informatik sowie die SafeAD GmbH. Die damit einhergehende Neuverteilung der Zuständigkeiten wurde durch das BMBF bestätigt; die fachlichen Zielstellungen und die Struktur der Arbeitspakete blieben davon unberührt.

Das FZI übernahm im Rahmen dieser Neuausrichtung zentrale Aufgaben in den Arbeitspaketen WP1 (Datenakquisition) und WP2 (Großskalige Datenannotierung), insbesondere in den Teilaufgaben T1.1 (Datenerfassung und -verarbeitung), T1.3 (Erstellung von 3D-Karten) sowie begleitend in T2.4 (semantische Strukturierung von Trajektorien). Die enge Abstimmung mit dem KIT als Betreiber des Sensorfahrzeugs sowie die unmittelbare Verzahnung mit den Entwicklungen von SafeAD in der kamerabasierten Kartenautomatisierung gewährleisteten einen nahtlosen Übergang. Bereits kurz nach Projektbeitritt konnte das FZI erste Beiträge zur Datenerfassung im Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg vorbereiten und in enger Kooperation mit dem KIT umsetzen. Die gewählte Einbindung ermöglichte es, die Ziele und Struktur der Vorhabenbeschreibung vollständig aufrechtzuerhalten, während gleichzeitig Synergien aus der bestehenden FZI-Expertise in semantischer Kartierung und Trajektorienanalyse genutzt wurden.

3 Projektverlauf und durchgeführte Arbeiten

Nach dem formalen Beitritt des FZI zum HAIBrid-Konsortium gegen Ende des Jahres 2022 konzentrierten sich die ersten Monate auf die organisatorische und technische Integration in die bestehende Projektstruktur. In enger Abstimmung mit dem KIT als Konsortialführer auf deutscher Seite beteiligte sich das FZI aktiv an Konsortial- und Arbeitstreffen, insbesondere zur Abstimmung der Datenaufnahmeorte, Sensoranforderungen und der Zielinhalte der geplanten Kartierungs- und Verarbeitungssoftware. Zu diesem Zeitpunkt lagen die Aufnahmemodalitäten bereits weitgehend vor, und das FZI bereitete die technische Infrastruktur für die bevorstehende Datenerfassung in Karlsruhe vor.

Die eigentliche Umsetzung der Aufgaben in Task 1.1 (Datenerfassung und Verarbeitung) und Task 1.3 (Erstellung von Kartendaten) begann Anfang 2023. Gemeinsam mit dem KIT wurde eine mehrwöchige Datenerfassungsphase im Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg (TAF-BW) durchgeführt. Zum Einsatz kam ein Erprobungsfahrzeug, ausgestattet mit mehreren Kameras und einem hochpräzisen 128-Kanal-LiDAR-System, ergänzt durch GNSS-IMU-Messsysteme und externe Videoquellen wie stationäre Kreuzungskameras und Drohnendaten. Die Auswahl der Szenarien orientierte sich an typischen Kreuzungssituationen mit einem hohen Maß an Interaktion zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern. Die daraus resultierenden Daten bilden die Grundlage für die späteren Lern- und Vorhersagemodule des Projekts.

Die vom FZI entwickelte Verarbeitungssoftware ermöglichte die zuverlässige Extraktion vollständiger, semantisch annotierter Trajektorien mit hoher räumlicher Präzision. Die Software kombiniert klassische Bildverarbeitungsmethoden mit moderner Detektions- und Trackinglogik auf Basis von Deep Learning und verwendet Kalman-Filter zur Glättung der Bewegungsverläufe. Die resultierenden Trajektorien werden zusätzlich um semantische Attribute wie Objektklasse oder Bewegungsrichtung angereichert. Besonderer Fokus lag auf der Robustheit der Erkennung über verdeckte oder teilverdeckte Bereiche hinweg. Es konnten Trajektorien mit hoher räumlicher Auflösung und einer maximalen Positionsabweichung von 50 cm erreicht werden. In Kombination mit der im Konsortium entwickelten Ground-Truth aus anderen Sensorsichten erlaubte dies eine objektive Bewertung der Erkennungsleistung.

Parallel zur Trajektorienextraktion wurde im Rahmen von Task 1.3 eine hochpräzise 3D-Karte für den Erfassungsbereich erstellt. Ziel war es, eine konsistente, vollständige und semantisch annotierte Karte im Lanelet2-Format zu erzeugen, die als Referenz für weitere Projektmodule, insbesondere für die automatische Kartierung von SafeAD, dient. Die Kartierung erfolgte in einem halbautomatischen Verfahren, das aus der Verarbeitung von Sensordaten (u. a. LiDAR und Bilddaten) geometrische Objektkandidaten extrahiert, die anschließend durch manuelle Validierung ergänzt und mit semantischen Informationen angereichert wurden. Diese Karte wurde bereits Anfang 2023 den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und diente somit als Grundlage für Training, Validierung und Benchmarking weiterer Methoden im Projekt.

Ein besonderer Aspekt der Kartierung war die Generierung eines zusätzlichen Debug-Modus, mit dem kartierte Objekte und ihre Relationen farblich und strukturell kodiert dargestellt werden. Dies ermöglichte es, die Korrektheit der Kartenelemente und deren Einbettung in das Regelwerk automatisiert zu überprüfen. Dazu wurde auch ein System zur Behandlung und Priorisierung von Verkehrsregeln innerhalb der Kartierung integriert, das sicherstellt, dass z. B. Vorfahrtsregelungen, Tempolimits oder Halteverbote eindeutig und widerspruchsfrei abgebildet sind.

4 Ergebnisse und Zielerreichung

Das FZI hat die übernommenen Aufgaben im Projekt HAIBrid erfolgreich umgesetzt. Die zentralen Ziele – die präzise Erfassung und Verarbeitung interaktionsreicher Verkehrsszenarien sowie die Erstellung einer hochaufgelösten, semantisch annotierten 3D-Referenzkarte – wurden vollumfänglich erreicht und bilden die Grundlage für die nachgelagerten Lern- und Vorhersageverfahren des Konsortiums.

Das entwickelte Verarbeitungsframework ermöglichte die zuverlässige Extraktion vollständiger und räumlich präziser Trajektorien für verschiedene Verkehrsteilnehmertypen. Die Kombination aus Deep-Learning-Detektion, Objektverfolgung und physikbasierter Glättung führte zu einer mittleren Positionsgenauigkeit von höchstens 50 cm und einer Trajektorienvollständigkeit von über 95 %. Ergänzend wurden semantische Merkmale wie Objektklasse und Bewegungsrichtung automatisiert zugeordnet.

Die halbautomatisch erzeugte 3D-Karte bildet die Infrastruktur des Erfassungsgebiets exakt ab und verknüpft geometrische Informationen mit Verkehrsregeln und semantischen Objektklassen. Sie wurde im Lanelet2-Format erstellt und durch zusätzliche Validierungswerkzeuge – u. a. farbcodierte Debug-Karten und Konfliktprüfungen – qualitätsgesichert. Die Karte stand den Projektpartnern bereits Anfang 2023 zur Verfügung und dient seitdem als gemeinsame Referenz.

Die Modellierung und Priorisierung von Verkehrsregeln stellte sich als technisch komplex heraus, konnte jedoch erfolgreich integriert werden. Der damit verbundene Mehraufwand wurde aus Eigenmitteln getragen und hatte keine negativen Auswirkungen auf den Projektverlauf.

Die Durchführung der in WP 1 verankerten Datenerfassung und Kartierung war zwingend erforderlich, weil alle in WP 2 und WP 3 vorgesehenen Verfahren explizit eine hochaufgelöste, konsistente Ground-Truth-Basis voraussetzen. Nur durch die vom FZI realisierte Pipeline – bestehend aus multimodaler Sensordatenfusion, semantischer Trajektorienextraktion und halbautomatischer Lanelet2-Kartierung – konnten die nachgelagerten Module trainings- und evaluationsfähig gemacht werden. Die zentrale Bündelung der Rohdaten beim FZI verhinderte Inkonsistenzen zwischen Teildatensätzen und reduzierte den Validierungsaufwand im gesamten Konsortium. Umfang und Tiefe dieser Arbeiten entsprechen damit exakt den im Projektantrag formulierten Anforderungen und waren für das Erreichen der Gesamtziele unabdingbar.

In Summe liegen nun ein vollständiger Datensatz, eine validierte Referenzkarte sowie ein modulares Softwaretoolset auf der FZI-Githubseite sowie eine Veröffentlichung vor, die sowohl wissenschaftlich nutzbar als auch industriell anschlussfähig sind. Alle Deliverables wurden termingerecht übergeben und in WP2 und WP3 unmittelbar verwendet. Aus Sicht des FZI sind die gesetzten Ziele damit voll erreicht worden.

Abbildung 1: Die in diesem Ausschnitt dargestellten roten Elemente umfassen alle in der Karte befindlichen Punkte und Linienzüge die die Realität zu dem Zeitpunkt der Kartenerstellung abbilden. Sie dienen neben der Kalibrierung der aufgestellten Sensoren durch Pfosten und anderen zylindrischen Objekten als Grundlage zur semi-automatischen Erstellung einer Lanelet2 3D-Karte, welche hochautomatisiertes Fahren in komplexen urbanen Szenarien ermöglicht.

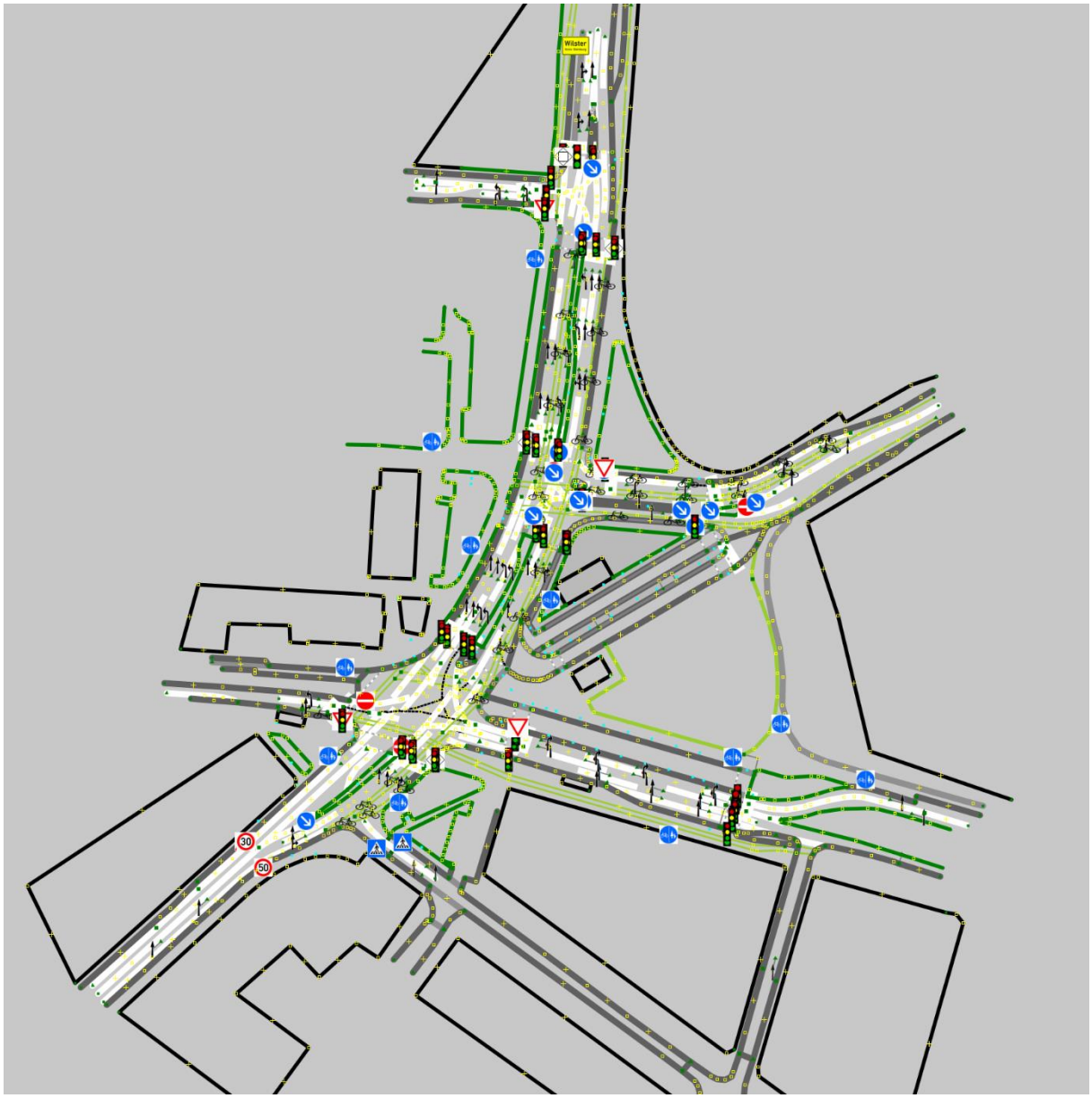

Abbildung 2: Die zuvor rot markierten Elemente werden hier nun mit der semantisch passenden Visualisierung dargestellt. In türkis sieht man die zylindrischen Objekte und Pfosten die in parametrischer Form mit 3D Parametern kartiert wurden. Basierend auf diesen Daten wird die Lanelet2 Karte generiert.

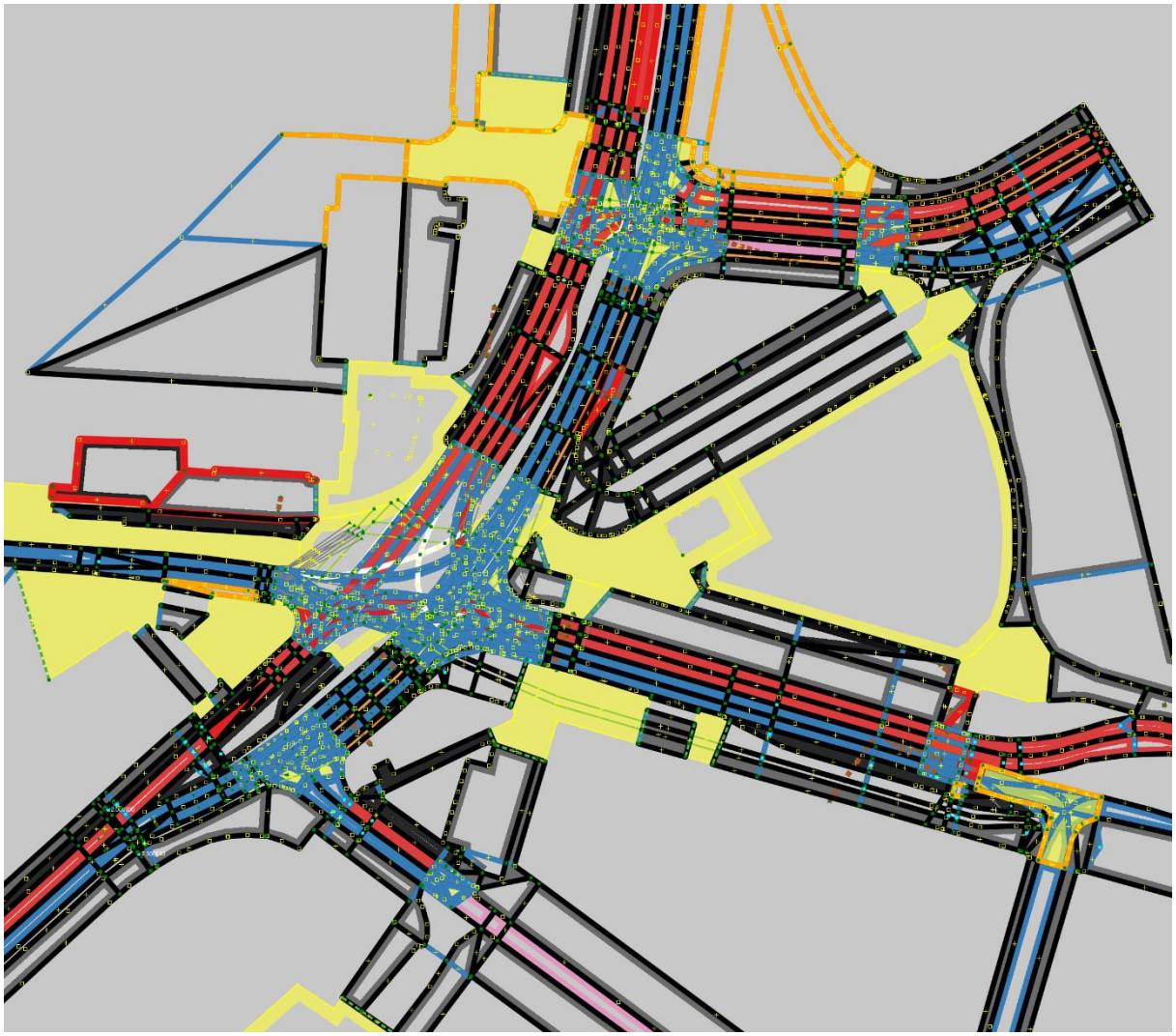

Abbildung 3: Zur Überprüfung der Lanelet2 Karte wird eine Debug-Karte produziert die Fahrtrichtungen farbig kodiert und mögliche Problem aufzeigt. Die in dieser Karte dargestellten Fahrstreifensegmente (Lanelets) werden als Routing und Planungsgrundlage von hochautomatisierten Fahrzeugen genutzt.

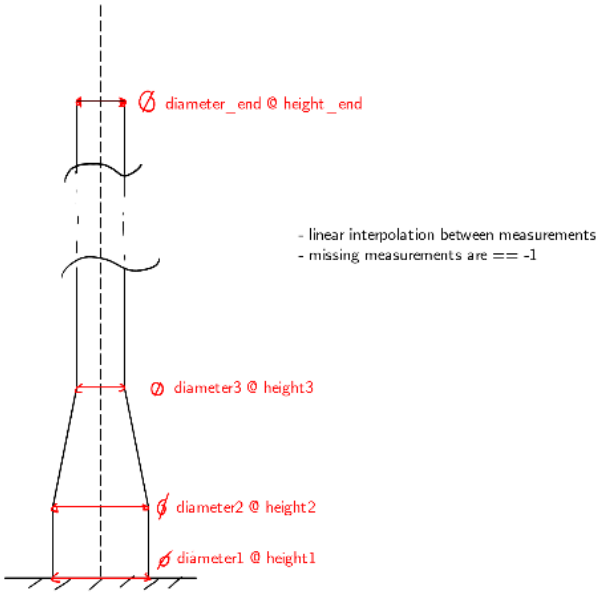

Abbildung 4: Die hier in rot dargestellten Messstellen der Pfostendurchmesser definieren die Parameter der modellierten zylindrischen Kartenelemente.

5 Vergleich zur Vorhabenbeschreibung

Die vom FZI übernommenen Aufgaben entsprachen inhaltlich der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung und wurden ohne Abweichung hinsichtlich Zielsetzung oder Struktur umgesetzt. Auch der spätere Einstieg des FZI ab dem zweiten Projektjahr hatte keine negativen Auswirkungen auf die Zeitplanung oder Ergebnisqualität. Alle relevanten Arbeitspakete – insbesondere die Datenerfassung, Trajektorienverarbeitung und Erstellung der Lanelet2-Karte – konnten im vorgesehenen Umfang abgeschlossen werden.

Lediglich im Rahmen der Kartierungsarbeiten ergab sich ein höherer Aufwand als zunächst geplant. Die Umsetzung eines konsistenten Regelmodells zur Abbildung und Priorisierung von Verkehrszeichen und -vorschriften erwies sich als technisch anspruchsvoll, da deren Erstellung und Abbildung in HD-Karten für das Automatisches Fahren nicht vollständig durch regelbasierte Automatisierung umsetzbar ist und regelmäßig menschliches kontextwissen erfordert. Die zusätzlich hierfür benötigten Ressourcen wurden intern bereitgestellt, ohne dass der Projektfortschritt oder andere Aufgabenbereiche beeinträchtigt wurden.

6 Synergieeffekte innerhalb des HAIBrid-Konsortiums

Die frühzeitige und qualitativ hochwertige Bereitstellung der semantisch annotierten Lanelet2-Referenzkarte sowie der präzisen, vollattribuierten Trajektoriendatensätze durch das FZI ermöglichte den französischen Partnern eine direkte Integration ihrer Verfahren in die gemeinsame Projektinfrastruktur. Insbesondere die Verwendung offener, standardisierter Formate (Lanelet2, GeoJSON) sowie der durch das FZI bereitgestellten Import- und Verarbeitungstools für diese offenen Standards, die über FZI-Github-Addresse öffentlich zur Verfügung gestellt wurden, reduzierte maßgeblich den Aufwand für Datenintegration, -validierung und Formatkonvertierungen. Darüber hinaus wurde auf Wunsch der Projektpartner in Konsortialmeetings kurzfristig ein farbcodierter Debug-Modus für die Karte implementiert, der die visuelle und automatische Prüfung der Korrektheit und Konsistenz von Verkehrsregeln deutlich erleichterte.

Im Gegenzug stellten die französischen Partner regelmäßig Rückmeldungen und Daten in Form von protokollierten Anomalien und Detektionsberichten bereit. Diese konnten vom FZI systematisch in das hauseigene Validierungs-Toolkit integriert werden, wodurch Inkonsistenzen automatisiert erkannt und behoben wurden. Die Einbindung dieser Rückmeldungen verbesserte die Qualität und Robustheit der Referenzdaten nachhaltig.

Zusammenfassend ermöglichte die enge Zusammenarbeit auf Basis gemeinsamer Daten- und Kartenstandards eine fruchtbare bidirektionale Qualitäts- und Validierungsschleife, von der sowohl das FZI als auch die französischen Forschungspartner profitierten.

7 Verwertungsperspektiven und Planung

Die im Projekt HAIBrid entwickelten Datensätze, Softwaretools und methodischen Grundlagen eröffnen verschiedene Perspektiven für zukünftige wissenschaftliche und industrielle Nutzung. Insbesondere die hochpräzisen Trajektoriendaten sowie die halbautomatisch erstellte Lanelet2-Referenzkarte dienen als wertvolle Grundlage für weitere Forschungsarbeiten im Bereich automatisiertes Fahren und KI-basierte Kartierung. Die Ergebnisse werden bereits aktiv für Folgeprojekte genutzt, die auf den HAIBrid-Ergebnissen aufbauen und diese weiterentwickeln.

Ein konkretes Beispiel ist das Forschungsprojekt „M3TR“ (A Generalist Model for Real-World HD Map Completion), das aus den Erkenntnissen und Herausforderungen des HAIBrid-Projekts hervorgegangen ist. Dieses Projekt widmet sich der online-basierten Aktualisierung und Vervollständigung hochauflösender Karten (HD-Maps) mit variablen Kartengrundlagen. M3TR nutzt dabei die vom FZI im Rahmen von HAIBrid etablierten Kartierungs- und Datenverarbeitungsverfahren sowie die semantisch reichhaltigen Lanelet2-Daten, um gezielt jene Bereiche einer HD-Karte online zu ergänzen, die aufgrund von Änderungen in der Verkehrsumgebung veraltet sind. Mithilfe neu entwickelter Transformer-basierter Algorithmen gelingt es M3TR, existierende Kartenelemente gezielt mit aktuellen Sensordaten zu verschmelzen, wodurch die HD-Karten permanent und mit minimalem manuellem Aufwand auf dem neuesten Stand gehalten werden können. Darüber hinaus werden die HAIBrid-Ergebnisse zukünftig weiter wissenschaftlich verwertet, beispielsweise durch Bereitstellung eines öffentlich zugänglichen Benchmark-Datensatzes für die Evaluierung KI-gestützter Kartierungs- und Verhaltensvorhersageverfahren.

Die im HAIBrid-Projekt gewonnenen Erfahrungen und Methodenkompetenzen fließen zudem in geplante Anschlussprojekte und Förderanträge ein. Dazu gehört insbesondere der bereits eingereichte DFG-Projektantrag „SPECTRA-DRIVE: Spectral Perception & Explainable Control“, der die HAIBrid-Daten und Verfahren nutzen wird, um multimodale Spektralkameras mit bestehenden Kartierungsverfahren zu integrieren. Hierdurch wird das Potenzial der hybriden KI-Verfahren für die robuste Umfelderkennung und Erklärbarkeit automatisierter Fahrentscheidungen weiter ausgeschöpft und vertieft.

8 Externer Fortschritt im Themenfeld während der Projektlaufzeit

Im weiteren wissenschaftlichen Umfeld wurden Fortschritte im Bereich der KI-gestützten HD-Kartierung erzielt, unter anderem durch eigene Folgearbeiten wie das Modell M3TR, das Transformer-basierte Verfahren zur kartografischen Vervollständigung einsetzt. Solche Entwicklungen unterstreichen die Relevanz und Anschlussfähigkeit der im Projekt HAIBrid verfolgten hybriden Methodik. Trotz technischer Dynamik im Themenfeld gab es keine externen Veränderungen, die eine inhaltliche Neuausrichtung erforderlich gemacht oder den Projekterfolg gefährdet hätten.

9 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts wurde eine Veröffentlichung erarbeitet, die derzeit als Preprint verfügbar ist und zur Einreichung bei einer Fachzeitschrift vorbereitet wird:

Fabian Immel, Richard Fehler, Frank Bieder, Jan-Hendrik Pauls, and Christoph Stiller. "M3TR: A Generalist Model for Real-World HD Map Completion", arXiv:2411.10316, 2025.