

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Übersicht autonomer Fahrsysteme

Bassem Hichri

Institut für Fahrzeugtechnik

Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik



Kurzfassung

Die Entwicklung autonomer Fahrsysteme hat durch Fortschritte in Rechenleistung, Sensortechnologie und künstlicher Intelligenz erheblich an Dynamik gewonnen, und die Komplexität dieser Systeme erfordert eine Integration verschiedener Technologien und Komponenten. Dieser Artikel gibt eine umfassende Übersicht über die Funktionsarchitektur autonomer Fahrsysteme. Dabei soll insbesondere ein Verständnis über die Aufgaben der erforderlichen Funktionsmodule und deren Schnittstellen geschaffen werden.

Einleitung

Die Automobilindustrie erlebt derzeit eine bemerkenswerte Entwicklung in Richtung autonomes Fahren, die maßgeblich durch signifikante Fortschritte in der Leistungsfähigkeit von Recheneinheiten und Sensoren angetrieben wird [1]. Autonome Fahrzeuge bieten das Potential, die Verkehrseffizienz zu erhöhen, die Reisekosten zu senken und gleichzeitig einen höheren Komfort zu bieten. Sie könnten die Gesamtzahl der Fahrzeuge verringern, innovative Mobilitätskonzepte vorantreiben und die Logistikbranche transformieren [2]. Darüber hinaus verspricht autonomes Fahren eine signifikante Steigerung der Verkehrssicherheit, da menschliches Fehlverhalten für über 90% der Unfälle verantwortlich ist [3].

Die Integration verschiedener Technologien und Komponenten ist entscheidend, um die komplexen Anforderungen autonomer Systeme zu erfüllen. Darunter zählen die Sensoren, die eine kontinuierliche Wahrnehmung der Umgebung ermöglichen sowie Algorithmen, die die Sensordaten verarbeiten, um die Fahrumgebung zu interpretieren und entsprechende Entscheidungen für die Bewältigung der Aufgabe zu treffen. Die Aufgabe der Aktorik besteht darin, diese Entscheidungen physikalisch umzusetzen.

Dieses Dokument bietet eine umfassende Einsicht in die einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel, um das komplexe Ökosystem autonomer Fahrsysteme besser zu verstehen. Ziel ist es, einen Überblick über den aktuellen

Stand der Technik sowie die zugrunde liegenden Technologien zu geben.

Funktionsarchitektur

Autonome Fahrsysteme setzen sich aus funktionalen Blöcken zusammen, deren Definition auf dem Informationsfluss und den Verarbeitungsschritten von der Datenerfassung bis zur Fahrzeugsteuerung basiert [4]. Aus dieser Perspektive lassen sich drei Funktionsebenen ableiten, die in den meisten vorgeschlagenen Architekturen und Lösungen aus der wissenschaftlichen und industriellen Literatur zu finden sind. Diese drei Ebenen umfassen die Sense-, Plan- und Act-Ebene [2]. Die funktionale Darstellung wird zudem auf Eingangs- und Ausgangsebene durch eine Hardwareebene (Sensorik, Aktorik) ergänzt.

Die Sense-Ebene ist in die Bestandteile Wahrnehmung und Modellierung zu unterteilen. Die maschinelle Wahrnehmung beschreibt die Fähigkeit von Computern, ihre Umgebung durch Interpretieren von Sensordaten, wie Kameras, Radar- und Lidarsensoren, zu verstehen. Die nachgelagerte Modellierung führt die prozessierten und interpretierten Sensordaten zusammen, um eine umfassende Beschreibung des Fahrzeugumfelds zu generieren [2].

Die Aufgabe der Plan-Ebene besteht darin, die erfassten Informationen der Fahrumgebung zu interpretieren und entsprechende Vorgaben für die Bewältigung der Fahraufgabe zu generieren [2].

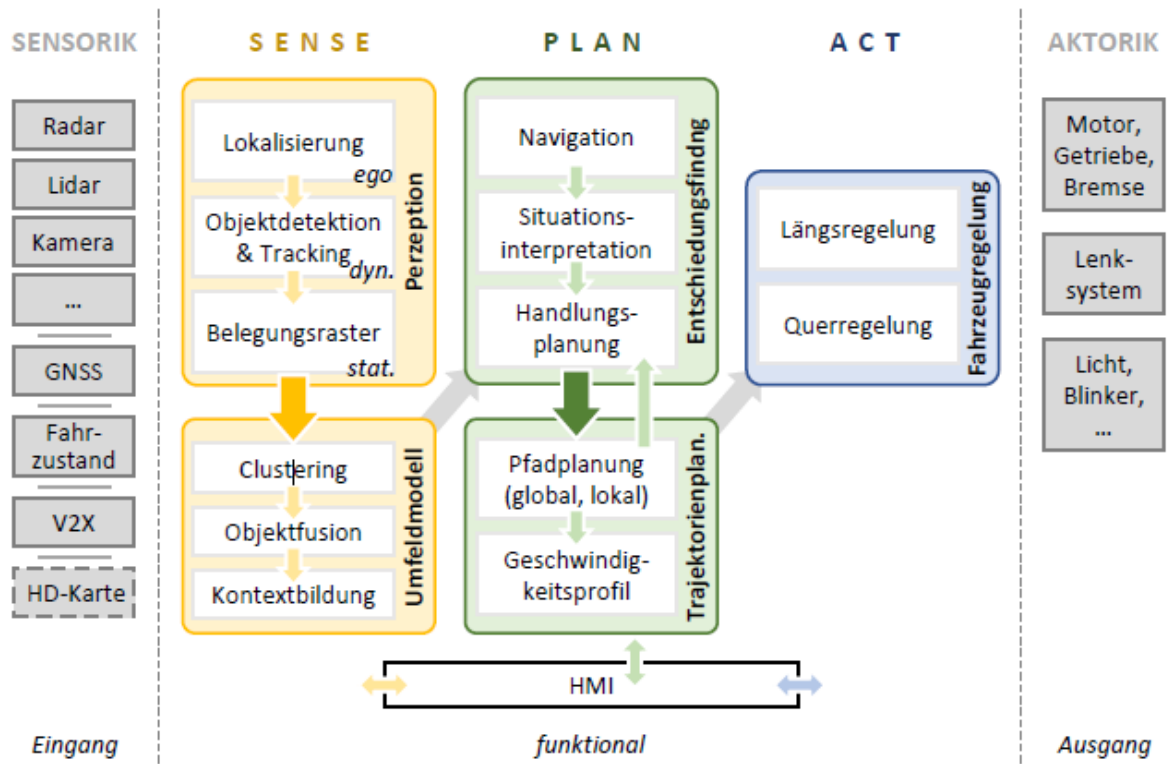


Abbildung 1: Funktionsarchitektur eines automatisierten Fahrsystems [2]

Die Aufgabe der Act-Ebene besteht darin, die Vorgaben der Planungsebene in Stellbefehle für die Fahrzeugaktorik zu übersetzen. Damit bewerkstelligt diese Ebene die Realisierung des vorgelagerten Planungsprozesses [2].

Im folgenden werden die drei Ebenen sowie die Sensorik und Aktorik vorgestellt. Dabei wird ein umfassender Überblick über die Aufgaben und Schnittstellen der Module gegeben.

A. Sensorik

Autonome Fahrsysteme erfordern eine Vielzahl an Sensoren, um eine präzise Wahrnehmung der Umgebung, eine zuverlässige Eigenlokalisierung und eine effiziente Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern sowie der Infrastruktur zu ermöglichen. Diese Sensorik lässt sich in drei Hauptkategorien unterteilen: Umfeldsensoren, Lokalisierungssensoren und Kommunikationssensoren.

Umfeldsensoren: Umfeldsensoren sind essenziell, um die Fahrzeugumgebung wahrzunehmen und zu interpretieren. Die verschiedenen

Prinzipien und Funktionen der Sensoren kommen in unterschiedlichen Anwendungsszenarien zum Tragen und lassen sich nur schwer gegenseitig ersetzen. Intelligentes und autonomes Fahren mit nur einem einzigen Sensor zu realisieren, ist unmöglich. Daher werden verschiedene Sensoren kombiniert, um sich gegenseitig zu ergänzen und letztlich die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Systeme zu verbessern. Zu den wichtigsten Umfeldsensoren gehören:

- **Radar:** Radarsensoren nutzen Funkwellen zur Erkennung von Objekten und deren Entfernung. Das System arbeitet mit Millimeterwellen und wird in Kurz-, Mittel- und Langstrecken-RADAR (SRR, MRR, LRR) unterteilt. Im Vergleich zu Kameras werden Radarsensoren weniger durch Wetter und schlechte Lichtverhältnisse beeinträchtigt, was es für einige Anwendungen wie die Erfassung von Objekten und die Abstandsschätzung sehr nützlich macht.

- *Lidar*: Lidarsensoren nutzen Laserimpulse zur Entfernungsmessung und erstellen hochauflösende 3D-Modelle der Umgebung. Es wird zwischen Mechanische und Festkörper Lidarsensoren unterschieden. Mechanische Lidarsysteme bieten ein 360-Grad-Sichtfeld, während Festkörper-Lidarsysteme kostengünstiger sind. LiDAR wird für Objekterkennung, Entfernungsmessung und hochauflösende Karten genutzt.
- *Kameras*: Fahrzeugkameras wandeln Licht in elektrische Signale um und liefern hochauflösende Bilder zur Objekterkennung. Sie sind essenziell für Spurhalteassistenten, Verkehrszeichenerkennung und Kollisionswarnsysteme. Während Kameras eine hohe Auflösung bieten, sind sie empfindlicher gegenüber schlechten Licht- und Wetterbedingungen.

Lokalisierungssensoren: Lokalisierungssensoren dienen der genauen Bestimmung der Fahrzeugposition und -orientierung. Wichtige Lokalisierungssensoren sind:

- *Global Navigation Satellite System (GNSS)*: GNSS ist ein satellitengestütztes Navigationssystem, das absolute Positionsdaten liefert. Durch die Kombination mehrerer Satellitensignale kann eine hohe Positionsgenauigkeit erreicht werden. In urbanen Gebieten kann jedoch die Präzision durch Signalabschattungen und Mehrwegeeffekte beeinträchtigt werden.
- *Inertiale Messeinheit (IMU)*: Die IMU besteht aus Beschleunigungssensoren und Gyroskopen, die die Eigenbewegung des Fahrzeugs erfassen. Sie misst lineare Beschleunigungen sowie Winkelgeschwindigkeiten und ermöglicht so eine kontinuierliche Schätzung der Fahrzeugpose, selbst bei temporärem GNSS-Ausfall.

Kommunikationssensoren: Kommunikationssensoren ermöglichen die Vernetzung des

Fahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern und der Infrastruktur. Dadurch können Informationen über die Verkehrssituation, Hindernisse und Gefahren frühzeitig ausgetauscht werden. Zu den wichtigsten Technologien zählt:

- *V2X-Kommunikation (Vehicle-to-Everything)*: V2X umfasst verschiedene Kommunikationsformen, die eine direkte oder netzwerkbasierende Kommunikation zwischen Fahrzeugen und ihrer Umgebung ermöglichen. Darunter können vier Hauptkategorien unterschieden werden: Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Infrastructure (V2I), Vehicle-to-Pedestrian (V2P) und Vehicle-to-Network (V2N). V2X-Kommunikation basiert auf zwei Haupttechnologien: Dedicated Short-Range Communication (DSRC) und Cellular V2X (C-V2X). Während DSRC auf WLAN-ähnlicher Technologie basiert, nutzt C-V2X Mobilfunknetze (4G/5G), um eine größere Reichweite zu ermöglichen.

B. Sense-Ebene

Die Sense-Ebene, unterteilt in Wahrnehmung und Modellierung, ist für das Interpretieren von Umgebungsdaten durch Computer verantwortlich. Daten werden typischerweise durch Technologien wie Lidar, Radarsensoren, Kameras und Ultraschall erfasst. Zu den Kernaufgaben dieser Ebene gehören die **Erfassung des statischen und dynamischen Umfelds, Freiraumanalyse, Bestimmung der Ego-Position und die Zusammenführung aller Daten** in ein **Umfeldmodell**. In den meisten Architekturen werden häufig Funktionsmodule wie **Objekterkennung und -tracking, Belegungsraaster, digitale Karten, Lokalisierung und Umfeldmodelle** verwendet.

Objektdetektion und -tracking: In objektbasierten Modellen wird die Umgebung durch einzelne Objekte beschrieben, denen Zustandseigenschaften wie Position, Geschwindigkeit, Orientierung, Klassifikation und Geometrie zugeordnet sind. Im Bereich des Computer-

Sehens existieren verschiedene Datenverarbeitungsprozesse, deren Terminologie für das weitere Verständnis definiert wird:

- *Segmentierung*: Die Segmentierung bezieht sich auf den Prozess, bei dem ein Bild oder eine Punktwolke in zusammenhängende Bereiche unterteilt wird, basierend auf definierten Homogenitätskriterium. Das Hauptziel besteht darin, die Informationen zu organisieren und relevante Regionen oder Objekte in den Daten zu identifizieren. Dieser Schritt dient oft als Vorbereitung für die anschließende Klassifikation.
- *Klassifikation*: Die Klassifikation ist der Prozess, bei dem jedem Punkt, Segment, Bild oder einem bestimmten Bereich eine spezifische Klasse oder Kennung zugeordnet wird, um es als Objekt zu beschreiben. Bei dynamischen Objekten könnte dies bedeuten, dass sie in Kategorien wie Autos, Fußgänger oder Radfahrer eingeteilt werden.
- *Detektion*: Die Detektion umfasst die Lokalisierung und Klassifizierung von Objekten in den Sensordaten und erweitert somit den Klassifikationsprozess. Zusätzlich zur Bestimmung der Objektklasse liefert die Detektion Informationen über die Wahrscheinlichkeit der Existenz eines Objekts sowie dessen Position und Abmessungen, die typischerweise in Form einer Box-Repräsentation (engl.: Bounding Box) dargestellt werden.
- *Tracking*: Objekttracking bezieht sich auf die kontinuierliche Verfolgung und Identifizierung eines Objekts über mehrere Zeitschritte. Dabei wird jedem verfolgten Objekt eine einzigartige Kennung (ID) zugewiesen, und die über die Zeit gesammelten Informationen über dessen Zustand werden als Track bezeichnet.

Im Rahmen der objektbasierten Detektion können sowohl statische als auch dynamische Objekte identifiziert werden. Im Zuge der

objektbasierten Detektion können sowohl statische als auch dynamische Objekte berücksichtigt werden, wobei gewisse Einschränkungen festgestellt werden. Allgemein beschreibt das statische Umfeld alle physischen Elemente, die räumlich fest gebunden sind. Dazu gehören Infrastrukturelemente wie Baustellenbarken, natürliche Elemente wie Bäume sowie temporär abgestellte Elemente wie parkende Fahrzeuge. Die Analyse der meisten Funktionsarchitekturen zeigt, dass objektbasierte Methoden für das statische Umfeld nur in spezifischen Anwendungsfällen funktional implementiert sind. Dies schließt die Detektion von Lichtsignalanlagen mitsamt deren Signalstatus sowie Schranken und Verkehrszeichen ein.

Dynamische Objekte hingegen umfassen bewegliche oder temporär wartende Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger, Radfahrer und Autos. Für deren Verfolgung werden üblicherweise Multi-Objekt-Tracking (MOT) Ansätze eingesetzt. Diese nutzen oft den Kalman-Filter kombiniert mit dynamischen Zustandsraummodellen. Solche probabilistischen Modelle ermöglichen es, dynamische Zustände unter Berücksichtigung von Messunsicherheiten über mehrere Zeitschritte hinweg zu verfolgen und zu schätzen. Neben der Schätzung der Zustandsgrößen erfolgt innerhalb des MOT-Filters auf Basis der Historie, der Modellannahmen und der aktuellen Sensormessungen die Berechnung einer Existenz- und Klassentyp-Wahrscheinlichkeit. Insgesamt bieten objektbasierte Verfahren Vorteile in Bezug auf ihre Recheneffizienz und weisen gleichzeitig keine Einschränkungen in der Modellierungreichweite auf. Zudem ermöglicht dieser Ansatz einen vergleichsweise einfachen Rückschluss auf die semantische Bedeutung der Objekte.

Belegungsraaster: Im Gegensatz zu der objektbasierten Beschreibung betrachten rasterbasierte Methoden das Umfeld gesamtheitlich und treffen keine kinematischen Modellhypothesen. Der bekannteste Vertreter dieser Methodik ist das sogenannte Belegungsraaster (engl. Occupancy Grid). Bei diesem Ansatz wird die Umgebung in ein zweidimensionales Gitter aus unabhängigen, gleich großen Zellen

unterteilt. Distanzmessungen, wie beispielsweise Lidar-Reflektionspunkte, werden den einzelnen Zellen zugewiesen und über mehrere Zeitschritte aggregiert, um die Belegungswahrscheinlichkeit jeder Zelle zu bestimmen. Hierbei ist es möglich, Messungen verschiedener Sensortypen in einem Raster zusammenzuführen. Anschließend wird ein sog. inverses Sensormodell angewendet, welches ausgehend von der Wirkung (Messung) auf die Ursache (Belegungswahrscheinlichkeit) schließt. Mittels Freiraumabtastung (engl.: Raytracing) werden alle zugehörigen Rasterzellen vor und hinter einem Messpunkt identifiziert. Anschließend werden die Belegungswahrscheinlichkeiten dieser Zellen entsprechend des inversen Sensormodells durch eine probabilistische Kennlinie festgelegt. Dadurch ergeben sich Zellen, welche als frei, belegt und unbekannt klassifiziert werden können. Zuletzt wird das Messraster des aktuellen Zeitschritts mit dem Belegungs raster der vergangenen Messungen fusioniert. Die Fusion kann bspw. durch ein binäres Bayes-Filter oder mittels der Dempster-Shafer-Evidenztheorie erfolgen.

Rasterbasierte Verfahren zur Umgebungserfassung sind aufgrund fehlender Modellannahmen in der geometrischen Darstellung von Objekten nicht eingeschränkt. Dies ermöglicht eine detaillierte Modellierung komplexer Strukturen sowie die Berücksichtigung von Freiräumen und Sensorabschattungen. Die Analyse bestehender Funktionsarchitekturen zeigt, dass sich der Einsatz solcher Verfahren in der Praxis etabliert hat. Gleichzeitig weisen rasterbasierte Verfahren den Nachteil auf, dass keine explizite Klassifikation einzelner Zellen erfolgt und dynamische Objekte zu Artefaktbildungen führen können. Schlussendlich weisen objekt- und rasterbasierte Verfahren komplementäre Vor- und Nachteile auf, weshalb eine Kombination beider Verfahren empfohlen wird.

Digitale Karten: Digitale Karten stellen neben der internen Fahrzeugsensorik eine zusätzliche Informationsquelle dar, um ein umfassendes Verständnis der Umgebung zu erlangen. Sie werden daher auch als virtueller bzw.

verborgener Sensor bezeichnet. In bestehenden Architekturkonzepten für automatisiertes Fahren sind digitale Karten entweder der Sensorebene oder dem Umfeldmodell zugeordnet. Die Karten bestehen aus mehreren Schichten, die sowohl statische als auch dynamische Informationen enthalten. Statische Umgebungsmerkmale ermöglichen in Kombination mit Echtzeit-Umfeld Daten eine präzise Lokalisierung des Fahrzeugs innerhalb der Karte. Topologische und semantische Informationen in weiteren Kartenschichten beschreiben die Verknüpfung des Straßennetzes und dessen Aufbau in Zentimeter-Genauigkeit inkl. zugehöriger Verkehrsvorgaben wie Tempolimits und Vorfahrtsregeln. Diese Informationen sind essenziell für verschiedene Funktionsmodule, darunter die Routenplanung, Trajektorienplanung, Handlungsplanung und Situationsinterpretation. Dynamische Kartendaten enthalten Echtzeitinformationen zu Straßensperrungen, Staus, Unfällen oder Wetterbedingungen. Zusätzlich können lokale Fahrbahnzustände und beobachtete Fahrgeschwindigkeiten integriert werden. Die Aktualisierung dieser Daten erfolgt typischerweise durch die Aggregation von Schwarmdaten mehrerer Fahrzeuge oder durch intelligente Infrastruktur. Zusammenfassend sind digitale Karten integraler Bestandteil aller Hauptebenen einer Funktionsarchitektur im automatisierten Fahren. Besonders in Szenarien mit schlechten Witterungsbedingungen oder Sensorabschattungen bieten sie eine unverzichtbare Ergänzung zur physikalischen Sensorik. Daher besteht ein allgemeiner Konsens über die Notwendigkeit digitaler Karten im automatisierten Fahren nach SAE-Level 3 und höher.

Lokalisierung: Die Lokalisierung dient der Bestimmung der Fahrzeugpose, bestehend aus Position und Orientierung, relativ zu einem Referenzkoordinatensystem. Innerhalb der Funktionsarchitektur ist sie unmittelbar hinter der Sensorebene angesiedelt und stellt eine essenzielle Grundlage für nahezu alle nachgelagerten Verarbeitungsschritte dar. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Lokalisierung beeinflussen direkt die Qualität der

Umfeldmodellierung, Trajektorienplanung und Navigationsentscheidungen. Beispielsweise erfordert die Fusion von Sensordaten mit hochauflösenden digitalen Karten eine präzise Posenbestimmung, um Fahrspurzuweisungen oder die Identifikation relevanter Kartenobjekte wie Haltelinien und Fußgängerüberwege korrekt vorzunehmen. Für eine kontinuierliche Posenbestimmung erfolgt in modernen Architekturen eine Kombination aus globalen und lokalen Lokalisierungsverfahren. Globale Methoden, wie GNSS (Global Navigation Satellite System), liefern absolute Positionsdaten im Referenzkoordinatensystem, arbeiten jedoch mit vergleichsweise niedriger Aktualisierungsrate (0,4–10 Hz). Lokale Lokalisierungsverfahren basieren hingegen auf Eigenbewegungsschätzungen und erfassen die relative Bewegung des Fahrzeugs mit hoher Frequenz (50–100 Hz). Die Fusion beider Ansätze mittels Zustandsschätzern, wie Kalman- oder Partikelfiltern, ermöglicht eine robuste und hochfrequente Lokalisierung. In der Fahrzeugtechnik haben sich insbesondere zwei globale Lokalisierungsansätze etabliert: die satellitenbasierte Lokalisierung (GNSS) und die umfeldsensorbasierte Lokalisierung. Während GNSS präzise Positionsdaten in offenen Außenbereichen liefert, ist seine Verfügbarkeit in urbanen Gebieten durch Abschattungen und Mehrwegeeffekte stark eingeschränkt. Alternativ ermöglichen umfeldsensorbasierte Verfahren eine Lokalisierung in Innenräumen oder komplexen Umgebungen, indem Sensordaten mit einer zuvor erstellten Karte assoziiert werden. Hierbei kommen Technologien wie Lidar, Kamera- oder Radarsysteme zum Einsatz, die Umgebungselemente erkennen und zur Positionsbestimmung nutzen.

Umfeldmodell: Als letztes Modul innerhalb der Sense-Ebene hat das Umfeldmodell die Aufgabe, eine möglichst akkurate Beschreibung der aktuellen Fahrumgebung auf Basis aller verfügbaren Informationen zu generieren. Es stellt somit innerhalb des Fahrsystems die digitale Repräsentation der physischen Welt dar. Als Informationsquellen dienen die prozessierten Daten der vorgelagerten Ebenen der

Perzeption. Zudem werden üblicherweise Daten der Sensorebene aus V2X-Kommunikation, digitalen Karten und internen Fahrzustandssensoren berücksichtigt. Infolgedessen stehen dem Umfeldmodell von Eingangsseite Daten zu statischen und dynamischen Objekten, der Straßengeometrie und -topologie, Verkehrszeichen, Ampelschaltzeiten, Fahrbahnmarkierungen, der Ego- sowie weiteren Merkmalen zur Verfügung. Das Umfeldmodell erfüllt drei Hauptaufgaben. Erstens werden sämtliche eingehenden Daten strukturiert und redundante Informationen identifiziert. Dies dient der Vereinfachung der nachfolgenden Verarbeitungsschritte und ermöglicht eine effiziente Handhabung der Daten. Zweitens erfolgt die Fusion der Sensordaten, um die Genauigkeit und Robustheit der Umgebungsdarstellung zu erhöhen. Dies geschieht unter Verwendung von Methoden der Sensordatenfusion, die widersprüchliche Informationen ausgleichen und so eine kohärente Umgebungskarte erzeugen. Drittens werden alle gesammelten Informationen in einen einheitlichen Referenzrahmen transformiert und logisch verknüpft, um neue Erkenntnisse zu gewinnen. Beispielsweise können detektierte Objekte in Verbindung mit der Ego- sowie einer hochauflösenden Karte zugeordnet werden, um ihre genaue Position in der realen Welt zu bestimmen. Das Umfeldmodell ist von entscheidender Bedeutung für die nachgelagerte Planungsebene, da es als Grundlage für die Interpretation des Verkehrsgeschehens dient. Es ermöglicht eine zuverlässige Situationsanalyse, die Prädiktion des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer sowie die Ableitung geeigneter Fahrstrategien. Damit beeinflusst die Qualität des Umfeldmodells maßgeblich die Leistungsfähigkeit und Sicherheit autonomer Fahrfunktionen.

C. Plan-Ebene

Die Plan-Ebene hat die Aufgabe, die erfassten Informationen der Fahrzeugumgebung zu interpretieren und entsprechende Vorgaben für die Bewältigung der Fahraufgabe zu generieren. Zentral ist dabei die Ableitung einer geeigneten Solltrajektorie, die als Referenz für die

nachgelagerte Fahrzeugregelung dient. Dieser Planungsprozess erfolgt in mehreren Schritten, beginnend mit der Analyse der aktuellen Situation bis hin zur Generierung der endgültigen Trajektorie. Innerhalb der Plan-Ebene ergeben sich vier zentrale Aufgaben.

Situationsinterpretation: Die Situationsinterpretation umfasst die Analyse der aktuellen Verkehrssituation sowie die Prädiktion des zukünftigen Verhaltens dynamischer Objekte. Ziel ist es, aus der Vielzahl verfügbarer Sensordaten die für die Entscheidungsfindung relevanten Informationen zu extrahieren und eine fundierte Basis für die Planungsebene bereitzustellen. Innerhalb dieses Moduls erfolgt eine Unterteilung in zwei zentrale Komponenten: die Situationsverständnis und die Situationsprädiktion.

Das Situationsverständnis beschreibt die Identifikation aller Daten aus dem Umfeldmodell, die für die gegenwärtige Situation von Relevanz sind. Dies umfasst bspw. die Selektion sicherheitsrelevanter dynamischer Objekte aus der Objektliste.

Die Situationsprädiktion prognostiziert das zukünftige Verhalten der detektierten dynamischen Objekte über einen bestimmten Zeitraum. Dazu werden Methoden des Machine Learning, der Trajektorienvorhersage und der Bewegungsmodellierung verwendet. Die Prädiktion ermöglicht eine frühzeitige Erkennung potenzieller Konfliktsituationen und dient als essenzielle Grundlage für die nachgelagerte Handlungs- und Trajektorienplanung.

Routenplanung: Das Ziel der Routenplanung besteht darin, basierend auf der aktuellen Fahrzeugposition eine optimale Route zum definierten Zielpunkt zu bestimmen. Zur effizienten Berechnung von Routen wird das Straßennetz als Graph modelliert, wobei Straßenabschnitte als Kanten und Kreuzungspunkte als Knoten dargestellt werden. Die Gewichtung der Kanten erfolgt typischerweise basierend auf Entfernungen, zulässigen Geschwindigkeiten oder aktuellen Verkehrsinformationen. Zur Ermittlung der optimalen Route kommen verschiedene Algorithmen zur Anwendung, wobei

der Dijkstra-Algorithmus aufgrund seiner optimalen Pfadsuche in gewichteten Graphen häufig genutzt wird. Dynamische Einflüsse wie temporäre Straßensperrungen oder Verkehrsstaus können durch eine adaptive Neuberechnung der Route berücksichtigt werden.

Eine vollständige Interpretation des Umfeldmodells ist erst durch Kenntnis der geplanten Route möglich, da die Relevanz detektierter Objekte maßgeblich von der Fahrtrichtung abhängt. Beispielsweise kann ein entgegenkommendes Fahrzeug nur dann als potenzielles Kollisionsrisiko bewertet werden, wenn es sich auf einer für die eigene Route relevanten Fahrspur befindet.

Handlungsplanung: Die Handlungsplanung stellt eine zentrale Komponente innerhalb der Plan-Ebene dar und ist für die Auswahl eines geeigneten Fahrmanövers verantwortlich. Sie bildet die Schnittstelle zwischen der Situationsinterpretation und der nachgelagerten Trajektorienplanung und beeinflusst maßgeblich die Sicherheit und Nachvollziehbarkeit des automatisierten Fahrverhaltens. Ziel ist es, verkehrsregelkonforme und für andere Verkehrsteilnehmer verständliche Befehle zu generieren. Die Handlungsplanung umfasst typischerweise zwei Ebenen:

1. *High-Level-Befehle:* Diese umfassen die Auswahl eines Zielmanövers, beispielsweise einen Spurwechsel, das Abbremsen, Anhalten oder Abbiegen.
2. *Low-Level-Befehle:* Diese beinhalten detaillierte Zustandsvorgaben, wie die gewünschte Position, Geschwindigkeit oder Beschleunigung des Fahrzeugs.

Die Generierung dieser Befehle erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren, darunter die aktuelle Verkehrslage, Vorfahrtsregeln, Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer. Um robuste Entscheidungen zu treffen, werden regelbasierte Methoden sowie algorithmische Entscheidungsmodelle eingesetzt. Die Umsetzung kann entweder durch deterministische Zustandsautomaten oder durch lernbasierte Verfahren erfolgen.

Trajektorienplanung: Die Trajektorienplanung stellt den finalen Schritt innerhalb der Planungsebene dar und bildet die Schnittstelle zur nachfolgenden Act-Ebene. Ziel dieses Moduls ist es, basierend auf der Vorgabe der Handlungsplanung eine geeignete Bewegungssequenz zu generieren, die das Fahrzeug vom aktuellen in einen gewünschten Zielzustand überführt. Die Ausgabe erfolgt in Form einer zeitabhängigen Trajektorie, die einen begrenzten Planungshorizont in die Zukunft abdeckt. In diesem Kontext ist zwischen *Pfaden* und *Trajektorien* zu unterscheiden. Während ein Pfad lediglich den geometrischen Bewegungsverlauf ohne Zeitbezug beschreibt (z. B. $x(y)$), umfasst eine Trajektorie zusätzlich eine zeitliche Dimension (z. B. $x(t)$, $y(t)$), wodurch eine vorausschauende Planung in einem dynamischen Umfeld ermöglicht wird. Die Trajektorienplanung berücksichtigt daher neben den Zielvorgaben der Handlungsplanung auch Umgebungsbedingungen, Verkehrssituationen und fahrdynamische Restriktionen.

D. Act-Ebene

Die Act-Ebene bildet die Schnittstelle zwischen der Planungsebene und der Fahrzeugaktork. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, die Vorgaben der Planungsebene in Stellbefehle für die Fahrzeugaktork umzusetzen. Damit übernimmt diese Ebene die Realisierung der zuvor berechneten Fahrstrategie. Als Eingangsgröße dient zum einen die geplante Trajektorie, auf deren Basis die Längs- und Querbewegung des Fahrzeuges umgesetzt wird. Zum anderen werden Vorgaben der Handlungsplanung berücksichtigt, um weitere Aktoren neben dem Antrieb und der Lenkung zu betätigen. Dazu zählt bspw. das Beleuchtungssystem (Licht, Blinker). Die zentralen Funktionsmodule der Act-Ebene umfassen:

- Regelung des Antrieb- und Bremssystems (Längsregelung)
- Regelung des Lenksystems (Querregelung)
- Regelung des aktiven Fahrwerks (Vertikalregelung, optional)

- Steuerung des Beleuchtungssystems (Licht, Fahrtrichtungsanzeiger)

In den meisten Architekturen werden die Längs- und Querregelung als zentrale Funktionsmodule der Act-Ebene identifiziert. Die Ansteuerung des Beleuchtungssystems wird nicht explizit in einem weiteren Modul ausgewiesen, da die Vorgaben der Handlungsplanung lediglich an den zugehörigen Aktor weitergeleitet werden müssen.

Längs- und Querregelung: Die Funktionsmodule der Längs- und Querregelung sind der letzten Ebene der Hierarchie zuzuordnen und gehören somit zur Stabilisierungsebene. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, das Fahrzeug sowohl geometrisch als auch dynamisch möglichst präzise entlang der geplanten Trajektorie zu führen. Dabei müssen sowohl kinematische als auch dynamische Restriktionen des Gesamtsystems sowie einzelner Aktoren berücksichtigt werden.

Zur Bestimmung der Regeldifferenz sind spezifische Eingangsinformationen erforderlich, darunter die aktuelle Fahrzeugpose sowie – abhängig vom jeweiligen Regelungskonzept – weitere Zustandsgrößen der Fahrzeugbewegung. Die Präzision, Stabilität und das Regelverhalten dieser Module haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Sicherheit und den Komfort des automatisierten Fahrens.

Die Analyse bestehender Funktionsarchitekturen zeigt, dass die Fahrzeugregelung üblicherweise auf kinematische Führungsgrößen angewiesen ist oder diese mithilfe von Fahrzeugmodellen ableitet. Dazu zählen beispielsweise eine Soll-Längsbeschleunigung oder ein Soll-Lenkwinkel, der aus dem zu befahrenden Kurvenradius bestimmt wird. Die Regelung nachgeschalteter Aktoren – etwa des Antriebssystems (Verbrennungsmotor oder Elektromaschine, Getriebe), des Bremssystems oder des Fahrwerks (elektromechanische Lenkung, Steer-by-Wire) – erfolgt durch Steuergeräte der jeweiligen Komponenten. Dieser Aspekt wird innerhalb der Fahrfunktionsarchitektur meist nicht weiter adressiert.

E. Aktorik

Die Aktorik ist für die physische Umsetzung der Fahrentscheidungen verantwortlich. Während die Act-Ebene die Stellgrößen für Antrieb, Lenkung und Bremsen berechnet, sorgen Aktoren für die direkte Ausführung dieser Befehle. Die Hauptkomponenten der Aktorik sind:

- **Antriebsaktorik:** Steuerung von Elektromotoren oder Verbrennungsmotoren zur Umsetzung der gewünschten Geschwindigkeit.
- **Bremsaktorik:** Umsetzung der Verzögerung durch hydraulische oder elektronische Bremssysteme (Brake-by-Wire).
- **Lenkaktorik:** Steuerung der Lenkbewegung über elektromechanische Lenksysteme oder Steer-by-Wire.
- **Fahrwerksaktorik:** Anpassung der Dämpfung und Federung zur Verbesserung von Stabilität und Komfort.
- **Zusatzaktorik:** Steuerung von Licht, Signalanlagen, Türen, usw.

Fazit

Autonome Fahrsysteme haben das Potenzial, die Mobilität grundlegend zu verändern, indem sie Verkehrssicherheit erhöhen, die Effizienz verbessern und neue Mobilitätskonzepte ermöglichen. Um die komplexen Anforderungen dieser Systeme zu erfüllen, ist die Integration verschiedener Technologien und Komponenten erforderlich.

Trotz der bemerkenswerten Fortschritte stehen Entwickler vor Herausforderungen wie der Anpassung an wechselnde Umweltbedingungen und der Ausweitung der Einsatzmöglichkeiten automatisierter Fahrsysteme auf einen breiteren Bereich.

Neben technologischen Hürden müssen auch regulatorische und ethische Fragestellungen gelöst werden, bevor autonome Fahrzeuge flächendeckend in den Verkehr integriert werden können. Zukünftige Entwicklungen sollten sich darauf konzentrieren, die Robustheit der Systeme zu erhöhen, die Akzeptanz in der Gesellschaft zu fördern und klare gesetzliche

Rahmenbedingungen zu schaffen. Nur durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Industrie, Forschung und Politik kann das Potenzial autonomer Fahrsysteme vollständig ausgeschöpft und eine nachhaltige Mobilitätswende vorangetrieben werden.

Literaturverzeichnis

[1] D. Omeiza, H. Webb, M. Jirotko, und L. Kunze, „Explanations in Autonomous Driving: A Survey“, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Bd. 23, Nr. 8, S. 10142–10162, Aug. 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3122865.

[2] M. Kascha, *Entwicklung einer Level-4-Funktion für das autonome Fahren*, Bd. 15. in Schriftenreihe Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme am Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, vol. 15. Düren: Shaker Verlag, 2025.

[3] E. Papadimitriou, „Thematic Report: Main factors causing fatal crashes“, Apr. 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://road-safety.transport.ec.europa.eu/document/download/a7428369-8eaf-4032-806e-ea08b46028c0_en?filename=ERSO-TR-Main-Causes.pdf

[4] G. Velasco-Hernandez, D. J. Yeong, J. Barry, und J. Walsh, „Autonomous Driving Architectures, Perception and Data Fusion: A Review“, in *2020 IEEE 16th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, Cluj-Napoca, Romania: IEEE, Sep. 2020, S. 315–321. doi: 10.1109/ICCP51029.2020.9266268.

Impressum

Förderhinweis:

Der Transformations-Hub MIAMy – Accelerate Market Introduction of autonomous Mobility wird vom Bundesministerium Wirtschaft und Klimaschutz aus der Förderbekanntmachung „Aufbau und Umsetzung von Transformations-Hubs zur Unterstützung von Transformationsprozessen in Wertschöpfungsketten der Automobilindustrie“ durch Zuwendung in Höhe von 4,7 Mio. € finanziert. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die des Autors/der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die Ansichten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz wider. Die Bewilligungsbehörde kann nicht für sie verantwortlich gemacht werden.

