

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Automatisierung eines Fahrzeugs auf Level 4

Bassem Hichri

Institut für Fahrzeugtechnik

Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik



## Einleitung

Die Entwicklung hochautomatisierter Fahrzeuge hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Nach der von der Society of Automotive Engineers (SAE) definierten Klassifikation werden Automatisierungsfunktionen in sechs Stufen von 0 (keine Automatisierung) bis 5 (vollständige Automatisierung) unterteilt. Level 4 bezeichnet Fahrzeuge, die in einem definierten Betriebsbereich (Operational Design Domain, ODD) sämtliche Fahraufgaben selbstständig übernehmen können. Ein menschlicher Fahrer ist innerhalb dieser ODD weder erforderlich noch vorgesehen [1].

Die Automatisierung auf Level 4 bringt jedoch neue Anforderungen an **Sicherheitskonzepte**, **Systemarchitekturen** und die **Integration komplexer Sensoren** mit sich. Im Vergleich zu Level 2+ oder Level 3 ist der Fahrer vollständig aus der Sicherheitskette entfernt, sodass das Fahrzeug selbst über **Fail-Operational-Fähigkeiten** verfügen muss.

Dieses Dokument beschreibt den Prozess der Automatisierung eines Pkw bis zur Erreichung von Level 4. Es konzentriert sich dabei auf drei wesentliche Entwicklungsbereiche:

1. **Konzeptentwicklung** – Definition des Betriebsbereichs, der funktionalen und technischen Architektur sowie relevanter Sicherheits- und Normanforderungen.
2. **Integration der Hardware-Komponenten** – Auswahl, Auslegung und Einbindung von Sensorik, Rechenplattformen und Kommunikationssystemen.
3. **Funktionsumsetzung** – Entwicklung und Implementierung der Software-Funktionen zur Wahrnehmung, Entscheidungsfindung und Trajektorienregelung sowie Validierung und Absicherung.

## Konzeptentwicklung

Die Konzeptentwicklung bildet die Grundlage für die Automatisierung eines Fahrzeugs auf Level 4. In dieser Phase werden die **Systemgrenzen**, der **Betriebsbereich (Operational Design Domain, ODD)**, die **funktionale Architektur** sowie die **Sicherheits- und Normanforderungen** definiert. Ziel ist es, einen klaren Rahmen für die nachfolgenden Hardware- und Softwareentwicklungen zu schaffen.

### 1. Definition der Systemgrenzen und des Betriebsbereichs

Die Definition des ODD ist entscheidend für den Entwicklungsumfang und die Komplexität des Systems. Sie beschreibt **wo, wann und unter welchen Bedingungen** die Level-4-Funktion verfügbar ist.

Typische ODD-Parameter sind:

- **Geografischer Bereich:** Autobahn, Innenstadt, Werksgelände
- **Infrastruktur:** Markierungen, Verkehrszeichen, Ampeln, V2X-Kommunikation.
- **Wetterbedingungen:** Klare Sicht, Regen, Schnee, Nebel.
- **Verkehrsdichte:** Freie Fahrt vs. dichter Mischverkehr.
- **Geschwindigkeitsbereich:** Z. B. < 50 km/h für Innenstadt-Shuttles oder bis 130 km/h für Autobahn-Piloten.

### 2. Ableitung funktionaler und sicherheitsrelevanter Anforderungen

Ausgehend von den Einsatzbedingungen werden die funktionalen und sicherheitsrelevanten Anforderungen an das Gesamtsystem abgeleitet. Dazu gehören unter anderem die notwendige Abdeckung der Fahrzeugumgebung durch Sensoren, die Präzision der Lokalisierung, die Anforderungen an die Reaktionszeiten und die Definition der Betriebsgrenzen des

automatisierten Fahrbetriebs. Ein zentraler Aspekt ist die Gewährleistung von Redundanz in allen sicherheitskritischen Teilbereichen, so dass auch bei Teilausfällen eine sichere Weiterfahrt oder ein kontrolliertes Anhalten gewährleistet werden kann.

### 3. Entwicklung der funktionalen Systemarchitektur

Basierend auf den definierten Anforderungen wird eine funktionale Systemarchitektur entworfen. Sie beschreibt die logischen Funktionsblöcke, ihre Schnittstellen und die Art der Interaktion. Wichtige Bestandteile sind:

- Wahrnehmung der Fahrzeugumgebung
- Präzise Lokalisierung und Eigenzustandsschätzung
- Umgebungsmodellierung und Situationsbewertung
- Trajektorien- und Manöverplanung
- Fahrzeugführung und Ansteuerung der Aktuatoren
- Sicherstellung von Fail-Operational-Strategien

Diese Architektur dient als Grundlage für die spätere Umsetzung in konkrete Hardware- und Softwarekomponenten.

### 4. Berücksichtigung von Sicherheits- und Normanforderungen

Ein wesentlicher Bestandteil der Konzeptentwicklung ist die frühzeitige Berücksichtigung sicherheitsrelevanter Normen und Richtlinien. Dazu zählen insbesondere:

- **ISO 26262** für funktionale Sicherheit [2]
- **ISO 21448 (SOTIF)** zur Berücksichtigung funktionaler Unzulänglichkeiten [3]
- Anforderungen an Cybersecurity gemäß **ISO/SAE 21434** [4]

- Gesetzliche Rahmenbedingungen für Test, Zulassung und Betrieb

## Integration der Hardware-Komponenten

### 1. Sensorik zur Umfeldwahrnehmung und Lokalisierung

Die Sensorik stellt die Grundlage für die Wahrnehmung der Fahrzeugumgebung. Um eine zuverlässige Automatisierung auf Level 4 zu ermöglichen, müssen bestimmte Anforderungen an die Umfeldwahrnehmung erfüllt werden:

- **360°-Abdeckung:** Alle relevanten Bereiche um das Fahrzeug herum müssen kontinuierlich überwacht werden, um auch dynamische Objekte wie andere Verkehrsteilnehmer oder Hindernisse rechtzeitig zu erkennen.
- **Redundanz:** Kritische Informationen dürfen nicht von einem einzelnen Sensorsystem abhängen. Mehrere Sensoren unterschiedlicher Technologien müssen sich gegenseitig absichern, um die funktionale Sicherheit auch bei Teilausfällen zu gewährleisten
- **Robustheit gegenüber Umgebungsbedingungen:** Die Sensorik muss unter wechselnden Licht-, Wetter- und Umgebungssituationen zuverlässig arbeiten.

Zur Umfeldwahrnehmung kommen typischerweise Radar-, Kamera- und Lidar-Systeme zum Einsatz [5].

- Radarsensoren sind robust gegenüber Witterungseinflüssen und liefern zuverlässige Informationen über Entfernungen und Relativgeschwindigkeiten von Objekten.
- Kamerasysteme erfassen hochauflösende Bilddaten und ermöglichen die Detektion und Klassifikation von relevanten Objekten.

- Lidar-Sensoren erzeugen hochpräzise 3D-Punktwolken und ermöglichen eine detaillierte Rekonstruktion der Fahrzeugumgebung, auch bei komplexen Szenarien.

Durch die Kombination unterschiedlicher Sensortechnologien entsteht eine funktionale Redundanz, die es ermöglicht, Teilausfälle einzelner Sensoren zu kompensieren und dennoch eine robuste und zuverlässige Umfeldwahrnehmung sicherzustellen.

Neben der Umfeldsensorik ist auch eine **präzise Lokalisierung** des Fahrzeugs notwendig. Hierfür werden typischerweise **GNSS-Empfänger mit Unterstützung von Korrekturdiensten** (z. B. RTK-GNSS) eingesetzt, um eine zentimetergenaue Positionsbestimmung zu ermöglichen. Ergänzend kommt eine **Inertial Measurement Unit (IMU)** zum Einsatz, die Beschleunigungen und Drehraten des Fahrzeugs kontinuierlich erfasst.

## 2. Hardware für die Kommunikation

Neben der Wahrnehmung durch bordeigene Sensorik gewinnt die **Car2X-Kommunikation** für hochautomatisierte Fahrfunktionen an Bedeutung. Unter Car2X (Vehicle-to-Everything, V2X) werden alle Kommunikationsformen verstanden, bei denen das Fahrzeug mit anderen Verkehrsteilnehmern, der Infrastruktur oder zentralen Diensten Daten austauscht [6].

Damit Car2X-Systeme zuverlässig im hochautomatisierten Fahrbetrieb eingesetzt werden können, müssen technische und sicherheitsrelevante Anforderungen erfüllt sein:

- **Geringe Latenz und hohe Verfügbarkeit**, um sicherheitskritische Informationen in Echtzeit zu übertragen.
- **Standardisierte Protokolle und Interoperabilität**, damit Fahrzeuge unterschiedlicher Hersteller und Infrastrukturkomponenten kompatibel sind.

- **Datensicherheit und Integrität**, um Manipulationen und unbefugten Zugriff zu verhindern.

Die Car2X-Kommunikation erweitert den Wahrnehmungshorizont des Fahrzeugs über die physikalischen Grenzen der Bord-Sensorik hinaus und ermöglicht damit die frühzeitige Erkennung verdeckter Gefahren. Gleichzeitig unterstützt sie die präzise Lokalisierung durch den Zugriff auf externe Korrekturdienste und trägt zur Verbesserung der Verkehrscoordination bei, beispielsweise durch kooperative Strategien an Kreuzungen. Darüber hinaus schafft sie zusätzliche Redundanz im Wahrnehmungssystem, wodurch die Robustheit hochautomatisierter Fahrfunktionen erhöht wird.

Darüber hinaus ist für die **Car2X-Kommunikation** spezifische Hardware erforderlich. Diese ermöglicht den Datenaustausch mit anderen Fahrzeugen (V2V) sowie mit der Infrastruktur (V2I), beispielsweise zur Nutzung von Lichtsignalinformationen oder GNSS-Korrekturdiensten für eine genauere Positionsbestimmung.

## 3. Hardware zur Sensordatenverarbeitung

Die im Fahrzeug erfassten Sensordaten besitzen eine **hohe Bandbreite und Heterogenität**, da sie aus unterschiedlichen Quellen wie Radar, Lidar, Kamera, GNSS und IMU stammen. Diese Daten müssen in **Echtzeit** verarbeitet und zu einer konsistenten Repräsentation des Fahrzeugumfelds zusammengeführt werden.

Aufgrund der **hohen Rechenanforderungen** ist der Einsatz eines **Hochleistungsrechners** notwendig. Dieser übernimmt die parallele **Verarbeitung der Sensordatenströme**, die **Berechnung der Eigenzustandsschätzung** und die **Erzeugung eines Umgebungsmodells**.

Das Umgebungsmodell aggregiert alle relevanten Informationen aus den Umfeldsensoren, der Lokalisierung und der Car2X-Kommunikation zu einem **konsistenten Abbild des Fahrzeugumfelds**.

Auf Grundlage dieses Umgebungsmodells können die übergeordneten Module zur

**Fahrentscheidungsfindung** und **Trajektorienplanung** arbeiten. Sie ermitteln den sichersten und effizientesten Fahrweg innerhalb der definierten Einsatzgrenzen und berücksichtigen dabei sowohl die aktuelle Umgebungssituation als auch zukünftige Entwicklungen im Verkehrsgeschehen.

Zur Erhöhung der funktionalen Sicherheit wird das Datenverarbeitungssystem in der Regel **redundant ausgelegt**. So verfügen hochautomatisierte Fahrzeuge wie der Waymo Driver über einen **sekundären On-Board-Computer**, der permanent im Hintergrund läuft. Dieser ist darauf ausgelegt, im Falle eines Fehlers im Primärsystem den Betrieb zu übernehmen oder das Fahrzeug kontrolliert in einen **sicheren Minimalzustand** zu versetzen, beispielsweise durch ein sicheres Anhalten am Straßenrand.

#### 4. Vernetzung und E/E-Architektur

Die Vernetzung und die zugrunde liegende E/E-Architektur hochautomatisierter Fahrzeuge müssen eine Vielzahl komplexer Anforderungen erfüllen. Sie bilden das Rückgrat für die Kommunikation zwischen Sensoren, Recheneinheiten und Aktoren und gewährleisten die zuverlässige Verarbeitung und Weitergabe sicherheitskritischer Informationen.

Wesentliche Anforderungen sind dabei:

- **Zuverlässige Integration** der unterschiedlichen Sensoren und Recheneinheiten trotz teilweise begrenzter Schnittstellen und Bus-Systeme
- **Hohe Bandbreiten** und **niedrige Latenzen**, um große Datenmengen in Echtzeit verarbeiten zu können
- **Nahtloser Informationsaustausch** über verschiedene Funktionsdomänen hinweg bei gleichzeitiger Wahrung der Systemsicherheit
- **Einfache Integration neuer Komponenten** und Systeme in bestehende Fahrzeugarchitekturen ohne Beeinträchtigung der Stabilität

- **Kapselung sicherheitskritischer Teilsysteme** gegenüber weniger kritischen Bereichen, um die Integrität der wichtigsten Funktionen zu sichern
- **Robuste und ausfallsichere Anbindung** aller betriebskritischen Systeme, auch bei Teilausfällen
- **Berücksichtigung der begrenzten elektrischen Leistung** der Bordnetze und Sicherstellung eines energieeffizienten Betriebs

Nur durch die Erfüllung dieser Anforderungen kann die E/E-Architektur als stabile und skalierbare Plattform für hochautomatisierte Fahrfunktionen dienen und gleichzeitig die Sicherheit sowie die Verfügbarkeit des Gesamtsystems gewährleisten.

## Funktionsumsetzung

Die Funktionsumsetzung stellt den zentralen Schritt dar, um aus den in der Konzeptphase definierten Anforderungen und der bereitgestellten Hardware eine funktionierende Level-4-Automatisierung zu realisieren. Sie umfasst die Entwicklung und Integration der Softwaremodule für Wahrnehmung, Situationsbewertung, Entscheidungsfindung und Fahrzeugführung. Darüber hinaus beinhaltet sie Mechanismen zur Validierung und Absicherung der entwickelten Funktionen.

### 1. Wahrnehmung und Umgebungsmodellierung

Die Wahrnehmungssoftware verarbeitet die Sensordaten von Kamera, Radar und Lidar, um Objekte, Fahrspuren, Verkehrszeichen und andere relevante Umgebungsmerkmale zu erkennen. Zusätzlich werden die Signale zur Lokalisierung, wie z. B. GNSS- und Inertialsensoren, integriert, um die Fahrzeugpose exakt zu bestimmen.

Die fusionierten Sensordaten werden in einem konsistenten **Umgebungsmodell** zusammengeführt, das dynamische Objekte (z. B. andere Verkehrsteilnehmer) und statische Infrastruktur (z. B. Fahrbahnbegrenzungen,

Markierungen) enthält. Dieses Modell bildet die Grundlage für die Situationsbewertung [7].

## 2. Situationsbewertung und Trajektorienplanung

Auf Basis des Umgebungsmodells erfolgt die Situationsbewertung, bei der die aktuelle Verkehrslage interpretiert und mögliche Szenarien vorhergesagt werden. Darauf aufbauend plant das System eine sichere Trajektorie, die sowohl die Verkehrsregeln als auch die Komfort- und Sicherheitsanforderungen berücksichtigt.

Die Trajektorienplanung muss:

- reaktiv auf plötzliche Änderungen im Umfeld reagieren,
- vorausschauend planen, um unnötige Manöver zu vermeiden

## 3. Fahrzeugführung und Akuatorensteuerung

Die Fahrzeugführung bildet die Schnittstelle zwischen der Planungsebene und der Fahrzeugaktuatorik. Ihre zentrale Aufgabe besteht darin, die von der Trajektorienplanung vorgegebenen Sollwerte in konkrete Stellbefehle für die Fahrzeugsysteme umzusetzen. Zu den Kernfunktionen gehören:

- **Längsregelung**, die die Ansteuerung von Antrieb und Bremssystem übernimmt,
- **Querregelung**, die die Spurhaltung durch Lenkwinkelvorgaben sicherstellt,
- optional eine **Vertikalregelung** für aktive Fahrwerksysteme,
- sowie die **Ansteuerung zusätzlicher Aktoren**, wie etwa des Beleuchtungssystems (Licht und Blinker), gemäß den Vorgaben der Handlungsplanung.

## 4. Absicherung und Validierung

Die Validierung der Funktionen ist ein zentraler Bestandteil der Funktionsumsetzung, da die Einhaltung der Sicherheits- und Leistungsanforderungen nachgewiesen werden muss. Hierfür werden verschiedene Teststufen eingesetzt:

- **Modell-in-the-Loop (MiL)** und **Software-in-the-Loop (SiL)** für die frühe Entwicklung und Prüfung der Logik,
- **Hardware-in-the-Loop (HiL)** zur Integrationstests mit realer Hardware,
- **virtuelle Tests in hochrealistischen Simulationsumgebungen**, die Millionen von Szenarien abdecken,
- sowie **Erprobungsfahrten im Realverkehr**, um das Verhalten unter realen Bedingungen zu evaluieren.

## Fazit

Die Entwicklung hochautomatisierter Fahrfunktionen bis Level 4 erfordert ein präzise abgestimmtes Zusammenspiel von Konzeptentwicklung, Hardwareintegration und Funktionsumsetzung. Bereits in der Konzeptphase werden mit der Definition des Betriebsbereichs (ODD), der funktionalen Architektur und der sicherheitsrelevanten Anforderungen die Grundlagen für alle weiteren Schritte gelegt.

Die Integration der erforderlichen Sensorik, Datenverarbeitungseinheiten, Kommunikationsschnittstellen und einer geeigneten E/E-Architektur stellt sicher, dass das Fahrzeug über die notwendige Redundanz, Robustheit und Rechenleistung verfügt, um die komplexen Anforderungen automatisierten Fahrens zuverlässig zu erfüllen.

Auf dieser technischen Basis erfolgt die Umsetzung der Softwarefunktionen – von der Umgebungswahrnehmung über die Situationsbewertung und Planung bis hin zur exakten Fahrzeugführung. Ein integraler Bestandteil dabei ist die Validierung, die über verschiedenste Teststufen sicherstellt, dass die entwickelten Funktionen zuverlässig, sicher und unter allen spezifizierten Bedingungen leistungsfähig sind.

Das Zusammenspiel all dieser Aspekte bildet die Grundlage für eine sichere, effiziente und normgerechte Realisierung hochautomatisierter Fahrfunktionen auf Level 4.

## Literaturverzeichnis

Braunschweig, vol. 15. Düren: Shaker Verlag, 2025.

- [1] SAE International, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (SAE J3016), April 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.sae.org/standards/j3016\\_202104-taxonomy-definitions-terms-related-driving-automation-systems-road-motor-vehicles](https://www.sae.org/standards/j3016_202104-taxonomy-definitions-terms-related-driving-automation-systems-road-motor-vehicles)
- [2] International Organization for Standardization, ISO 26262: Road Vehicles – Functional Safety, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/68383.html>
- [3] International Organization for Standardization, ISO 21448: Road Vehicles – Safety of the Intended Functionality (SOTIF), 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/77490.html>
- [4] SAE International und International Organization for Standardization, ISO/SAE 21434: Road Vehicles – Cybersecurity Engineering, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/70918.html>
- [5] A. Pandharipande et al., „Sensing and Machine Learning for Automotive Perception: A Review,“ IEEE Sensors Journal, Bd. 23, Nr. 11, S. 11097-11115, Jun. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3262134.
- [6] D. Bajpayee und J. Mathur, „A comparative study about autonomous vehicle“, in 2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), Coimbatore, India: IEEE, März 2015, S. 1–6. doi: 10.1109/ICIIECS.2015.7193002.
- [7] M. Kascha, Entwicklung einer Level-4-Funktion für das autonome Fahren, Bd. 15. in Schriftenreihe Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme am Institut für Fahrzeugtechnik, TU

## **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.

