

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Entwicklung eines autonomen Personenshuttles Level-4

Bassem Hichri

Institut für Fahrzeugtechnik

Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik



Einleitung

Die Mobilität befindet sich im Wandel. Autonome Fahrzeuge – insbesondere hochautomatisierte Shuttles – gelten als vielversprechende Lösung für zukünftige Verkehrssysteme. Sie können den öffentlichen Personennahverkehr sinnvoll ergänzen, die Anbindung in ländlichen oder infrastrukturschwachen Regionen verbessern und eine effiziente, barrierefreie Mobilitätsoption auf definierten Strecken oder in abgegrenzten Arealen bereitstellen.

Autonome Shuttles nach Level 4 der SAE-Klassifikation sind in der Lage, bestimmte Betriebsbereiche (Operational Design Domains, ODDs) vollständig eigenständig zu befahren – ohne Fahrer, jedoch mit klar definierten Systemgrenzen und Rückfallebenen [1]. Die Entwicklung solcher Fahrzeuge erfordert eine enge Verzahnung verschiedenster Disziplinen: von der Konzeptplanung und Fahrzeugentwicklung über die Auslegung der Sensorik und Softwarearchitektur bis hin zu Sicherheitsnachweisen, Zulassungsprozessen und infrastrukturellen Voraussetzungen.

Dieser Leitfaden bietet einen strukturierten Überblick über die zentralen Schritte bei der Entwicklung eines autonomen Personenshuttles auf Level 4 - von der ersten Konzeptidee über die technische Umsetzung bis hin zur Zulassung und dem sicheren Betrieb im realen Umfeld.

Konzeptentwicklung

Die Konzeptentwicklung bildet die Grundlage für alle weiteren Schritte bei der Realisierung eines autonomen Personenshuttles. In dieser Phase werden die Rahmenbedingungen, Zielsetzungen und technischen Grundannahmen definiert. Eine sorgfältige Analyse und Planung ist entscheidend, um spätere technische, regulatorische oder betriebliche Hürden frühzeitig zu erkennen und zu adressieren.

1. Zieldefinition und Use Cases

Zu Beginn steht die klare Definition des Einsatzzwecks. Autonome Shuttles können in vielfältigen Szenarien eingesetzt werden – etwa auf Werksgeländen, in innerstädtischen Gebieten oder auf Universitätscampus. Für jedes Einsatzszenario sind unterschiedliche Anforderungen an Reichweite, Geschwindigkeit, Kapazität und Infrastruktur zu berücksichtigen. Typische Zielparameter sind:

- Anzahl der Fahrgäste und Sitz-/Stehplätze
- Streckenlänge, Fahrtdauer, Haltepunkte
- Betriebszeiten (Tag/Nacht, werktags/wochenends)
- Anforderungen an Barrierefreiheit und Nutzerinteraktion

2. Betriebsumgebung und Randbedingungen

Die Definition der **Operational Design Domain (ODD)** ist ein zentraler Aspekt bei Level-4-Fahrzeugen. Dabei wird festgelegt, unter welchen Bedingungen das Fahrzeug automatisiert betrieben werden darf. Dazu gehören:

- **Geografische Abgrenzung:** feste Routen, definierte Zonen.
- **Witterungsbedingungen:** z. B. kein Betrieb bei starkem Schneefall.
- **Verkehrsszenarien:** Mischverkehr mit Radfahrern oder nur Fußgängerzonen.
- **Infrastrukturelle Voraussetzungen:** Markierungen, Verkehrszeichen, Ampeln, V2X-Kommunikation.
- **Geschwindigkeitsbereich:** Z. B. < 50 km/h für Innenstadt-Shuttles.

Diese Einschränkungen beeinflussen maßgeblich die spätere Sensorik, Softwarearchitektur und Sicherheitsstrategien.

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

Aufbauentwicklung

Die Aufbauentwicklung umfasst die konkrete Umsetzung des Fahrzeugkonzepts in ein physisches, funktionsfähiges Shuttle. Dabei stehen sowohl die mechanische und elektrische Integration als auch gestalterische und sicherheitstechnische Anforderungen im Fokus. Ziel ist es, eine robuste, wartbare und für den Einsatz im definierten ODD geeignete Fahrzeugplattform zu schaffen.

1. Fahrzeugplattform und Chassis

Ein zentrales Element der Aufbauentwicklung ist die Wahl einer geeigneten Fahrzeugplattform. Hierbei gibt es zwei grundsätzliche Herangehensweisen:

- **Verwendung einer bestehenden Plattform:** Hierbei wird auf eine bereits entwickelte elektrische Kleinbus-Plattform zurückgegriffen, etwa auf Basis eines E-Transporters oder Fahrgestells eines Nutzfahrzeugherstellers. Diese Option kann Entwicklungszeit und Kosten reduzieren, setzt aber voraus, dass die Plattform die nötigen Schnittstellen (z. B. für Drive-by-Wire, CAN-Anbindung, Energieversorgung) bereits mitbringt oder entsprechend nachgerüstet werden kann.
- **Neuentwicklung einer autonomen Shuttle-Plattform:** Diese Option eröffnet die Möglichkeit, ein speziell auf autonome Anforderungen ausgelegtes Fahrzeug zu konzipieren – beispielsweise mit einem symmetrischen Design, niedrigem Einstieg und vollständig modularer Architektur. Insbesondere für kleine Stückzahlen oder Forschungsprojekte kann dies sinnvoll sein.

In beiden Fällen müssen die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- **Fahrdynamik und Geschwindigkeit:** Shuttles bewegen sich typischerweise im Bereich von 20–50 km/h. Dies beeinflusst Anforderungen an Fahrwerk, Federung und Antrieb.
- **Tragfähigkeit und Gewicht:** Das Fahrzeug muss das Gewicht der Sensorik, Steuergeräte und zusätzlichen Stromversorgungen aufnehmen können.
- **Energieversorgung:** Die Batterieauslegung muss neben dem Antrieb auch die Versorgung aller IT-Systeme und Sensoren sicherstellen.

2. Integration mechanischer und elektrischer Komponenten

Autonome Fahrzeuge benötigen eine präzise Abstimmung mechanischer, elektrischer und elektronischer Komponenten. Dies umfasst unter anderem:

- **Lenk- und Bremssysteme** mit Redundanz und elektrischer Ansteuerbarkeit
- **Fahrwerksintegration** für niedrige Geschwindigkeit bei hohem Fahrkomfort
- **Energieversorgung** (Hochvolt für Antrieb, 12/24 V für Bordnetz)
- **Kabelbäume und Schnittstellen** für Sensorik, Aktorik und Kommunikation

Die Integration sollte wartungsfreundlich, robust und EMV-sicher erfolgen.

3. Sensor-Setup und Platzierung

Eine zuverlässige und redundante Umfelderkennung ist essenziell für den sicheren Betrieb eines Level-4-Shuttles. Die Auswahl und Positionierung der Sensorik richtet sich nach dem ODD, dem erwarteten Verkehrsaufkommen sowie typischen Szenarien [5].

Typische Sensorik-Komponenten:

- **Lidar:** 3D-Punktwolken für präzise Objekt- und Umfeldvermessung;

typischerweise an Dachkante, Stoßfänger oder Fahrzeugseiten

- **Radar:** robuste Erkennung bei schlechten Sichtverhältnissen; sinnvoll zur Abdeckung frontaler und seitlicher Bereiche
- **Kamerasysteme:** ermöglichen semantische Erkennung von Verkehrsschildern, Fahrbahnmarkierungen und Objekten; oft rundum angeordnet
- **GNSS + IMU:** zur hochgenauen Lokalisierung (unterstützt durch Korrekturdaten, z. B. RTK)

Die Platzierung sollte so erfolgen, dass tote Winkel vermieden werden und alle kritischen Bereiche (z. B. Kreuzungen, Ein-/Ausstiegszonen) zuverlässig erfasst werden können.

4. Innenraumgestaltung

Die autonome Fahrfunktion erlaubt es, den Innenraum völlig neu zu gestalten, da kein klassischer Fahrerarbeitsplatz mehr erforderlich ist. Dabei stehen **Funktionalität, Komfort** und **Sicherheit** der Fahrgäste im Mittelpunkt.

Wichtige Gestaltungsaspekte:

- **Barrierefreiheit:** Rampen, Haltebügel, taktile Leitsysteme, Sprachführung
- **Flexible Sitzanordnung:** z. B. vis-à-vis, U-Form oder Einzelplätze – abhängig von der maximalen Kapazität und dem Einsatzszenario.
- **HMI-Systeme für Fahrgäste:** Anzeige der nächsten Haltestelle, Routeninformationen, Interaktionsmöglichkeiten
- **Sicherheitsfunktionen:** Innenraumüberwachung, Notbremsknöpfe, Kommunikation mit der Leitstelle.
- **Zugangssysteme:** (z.B. automatische Türen, Lichtschranken, Ein-/Ausstiegserkennung)

Besonderes Augenmerk sollte auf die **Anpassung an das jeweilige Einsatzszenario** gelegt werden. So erfordern Shuttles im öffentlichen

Verkehr andere Anforderungen als Fahrzeuge für Werksgelände, Universitätscampus oder Freizeitparks. In touristischen Anwendungen kann etwa eine offenere Gestaltung mit Panoramaverglasung sinnvoll sein, während im innerstädtischen Bereich eine robuste, vandalismussichere Ausführung im Vordergrund steht. Auch die Gestaltung von Informationssystemen (HMI), Sitzanordnung, Einstiegshilfen und Sicherheitsfunktionen sollte entsprechend der Zielumgebung und Nutzergruppe erfolgen.

Entwicklung autonomer Systeme

Das autonome Fahrsystem bildet die zentrale technologische Komponente eines Fahrzeugs der Automatisierungsstufe 4 gemäß SAE J3016. Es integriert sämtliche Elemente zur Umfeldwahrnehmung, Entscheidungsfindung und Fahrzeugführung, darunter Sensoriksysteme, Rechenplattformen, Steuergeräte, Softwarearchitekturen sowie interne und externe Kommunikationsschnittstellen.

1. Hardware

A. 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 [5]:

- **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.

- 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 [6].

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.

B. 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 [7].

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.

C. 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 [8].

D. 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 Latenzzeiten**, 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 [5].

2. Software

Die Softwarearchitektur eines autonomen Shuttles umfasst eine Vielzahl funktionaler Module, die im Zusammenspiel das automatisierte Fahren ermöglichen. Die folgenden Kernfunktionen sind typischerweise enthalten:

A. 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 [9].

B. 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 soll:

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

C. 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 [9].

D. 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.

Zulassung und Zertifizierung

Die Inbetriebnahme eines autonomen Fahrzeugs der Stufe 4 erfordert die Erfüllung komplexer regulatorischer, normativer und sicherheitstechnischer Anforderungen.

1. Rechtlicher Rahmen

Die rechtliche Grundlage für den Betrieb von hochautomatisierten Fahrzeugen variiert je nach Region. In Deutschland bildet insbesondere das Gesetz zum autonomen Fahren (§§ 1d–1f StVG) in Verbindung mit der **Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs- und Betriebsverordnung (AFGBV)** den zentralen regulatorischen Rahmen.

2. Typgenehmigung und Betriebsgenehmigung

Für den Betrieb eines Level-4-Shuttles sind in der Regel zwei Verfahren zu durchlaufen:

- **Typgenehmigung gemäß EG-FGV oder UNECE-Regelwerk:** Erforderlich für Serienfahrzeuge mit Zulassung im öffentlichen Straßenverkehr. Sie umfasst die Prüfung aller sicherheitsrelevanten Systeme und Bauteile.
- **Einzelfallgenehmigung / Ausnahme-genehmigung:** Wird häufig im Rahmen von Pilotprojekten angewendet. Hier erfolgt eine individuelle technische Prüfung des Fahrzeugs sowie eine Bewertung des Betriebskonzepts und der

ODD durch eine benannte Technische Prüfstelle.

3. Funktionale Sicherheit

Die funktionale Sicherheit autonomer Fahrfunktionen muss gemäß der Norm **ISO 26262** sichergestellt werden. Dabei steht die systematische Identifikation, Bewertung und Beherrschung sicherheitskritischer Fehler im Vordergrund. Zusätzlich ist die **SOTIF-Norm (ISO/PAS 21448)** relevant, die Risiken adressiert, die nicht durch Hardware- oder Softwarefehler, sondern durch unzureichende Situationsinterpretation entstehen.

Typische Nachweise umfassen:

- Gefährdungs- und Risikoanalysen (HARA)
- Sicherheitsanforderungsspezifikation (TSC, FSC)
- ASIL-Einstufung sicherheitskritischer Funktionen
- Sicherheitsarchitektur und Maßnahmen zur Fehlerdetektion, -vermeidung und -beherrschung

4. Behördenbeteiligung und Genehmigungsprozess

Der Genehmigungsprozess erfolgt in enger Abstimmung mit:

- **Technischen Prüfstellen** (z. B. TÜV, DEKRA)
- **Zuständigen Zulassungsbehörden** (z. B. Kraftfahrt-Bundesamt)

Die Qualität, Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit der technischen Dokumentation – insbesondere im Hinblick auf sicherheitsrelevante Nachweise sowie das technisch-organisatorische Betriebskonzept – stellt einen zentralen Einflussfaktor für die Effizienz und den Erfolg des behördlichen Genehmigungsprozesses dar.

Fazit

Die Entwicklung eines autonomen Personenshuttles auf Level-4-Niveau erfordert ein systematisches Zusammenspiel von Fahrzeugtechnik, Softwareentwicklung, funktionaler Sicherheit und regulatorischer Konformität. Zentrale Erfolgsfaktoren sind eine klar definierte Betriebsumgebung, ein sicherheitsgerichtetes Systemdesign sowie eine frühzeitige Einbindung zulassungsrelevanter Anforderungen.

Literaturverzeichnis

- [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
- [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] “Work Package Vehicle,” ABSOLUT-Project, ABSOLUT I Work Packages, online: <https://absolut-project.com/absolut-i/arbeitspakete/fahrzeug/>, Zugriff am 10.10.2025.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] C. Iclodean et al., „Autonomous Shuttle Bus for Public Transportation: A Review,“ Energies, vol. 13, no. 11, Art. 2917, 2020, doi: 10.3390/en13112917.
- [9] 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.

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.

