Forschungsvortrag

Funktionale Sicherheit bei autonomen Fahrzeugen

Dr. Antoine Tordeux

Josephstraße 6, 50678 Köln
Tel.: +49 (0)163 7550447

18. Oktober 2016 in Wuppertal

Übersicht

Übersicht

Einführung

Die **Straßenfahrzeuge** werden zunehmend automatisiert (VDA, 2015).

$\rightarrow$ E/E Fahrerassistenz- und Automatisierungssysteme

Einführung

Die **Straßenfahrzeuge** werden zunehmend automatisiert (VDA, 2015).

→ E/E Fahrerassistenz- und Automatisierungssysteme

Klassifizierung der Automatisierung von Straßenfahrzeugen (BASt, 2012)

L0	Driver only (Warm- und Assistenzsysteme möglich)	
L1	Assistiert (ACC, Spurhalten)	Unter Fahrerüberwachung
L2	Teilautomatisiert (Quer- und Längsführung)	
L3	Hochautomatisiert (in spezifische Fahrsituationen)	Ohne Fahrerüberwachung
L4	Vollautomatisiert (in allen definierten Situationen)	

Einführung

Die **Straßenfahrzeuge** werden zunehmend automatisiert (VDA, 2015).

→ E/E Fahrerassistenz- und Automatisierungssysteme

Klassifizierung der Automatisierung von Straßenfahrzeugen (BASt, 2012)

L0	Driver only (Warm- und Assistenzsysteme möglich)	
L1	Assistiert (ACC, Spurhalten)	Unter Fahrerüberwachung
L2	Teilautomatisiert (Quer- und Längsführung)	
L3	Hochautomatisiert (in spezifische Fahrsituationen)	Ohne Fahrerüberwachung
L4	Vollautomatisiert (in allen definierten Situationen)	

Aktueller Zustand: Niveau L0-L1-L2

Voraussagen: Niveau L3: 2020-2030

Niveau L4: Unbekanntes Datum

Risiko bei autonomen Fahrzeugen

Zentraler Aspekt für das autonome Fahren ist die **Sicherheit**.

> Sicherheit ist eines der wesentlichen Argumente:
>
> – **für** die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge ($>$ 90 % der Unfälle hätten menschliche Ursachen (Singh, 2014)),
>
> – und **gegen** (Sicherheit des autonomen Fahrens zu beweisen).

Risiko bei autonomen Fahrzeugen

Zentraler Aspekt für das autonome Fahren ist die **Sicherheit**.

> Sicherheit ist eines der wesentlichen Argumente:
>
> – **für** die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge ($>$ 90 % der Unfälle hätten menschliche Ursachen (Singh, 2014)),
>
> – und **gegen** (Sicherheit des autonomen Fahrens zu beweisen).

Größte Risikoquelle sind **Kollisionen** (Lefèvre et al., 2014):

$\rightarrow$ Die Höhe des Schadensausmaßes hängt von der Geschwindigkeit und vom Kollisionstyp ab,

$\rightarrow$ Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist gering (sehr wenige Kollisionen pro gefahrene Kilometer).

Limit der empirischen Bewertungen

Trotz vieler Unfälle im Straßenverkehr ist die **Wahrscheinlichkeit, verletzt oder getötet zu werden, sehr gering**.

→ Beispiel USA :
- Verletzungsrate liegt bei 40 pro 100 Mio Kilometer
- Todesrate liegt bei 0.7 pro 100 Mio Kilometer

Limit der empirischen Bewertungen

Trotz vieler Unfälle im Straßenverkehr ist die **Wahrscheinlichkeit, verletzt oder getötet zu werden, sehr gering**.

→ Beispiel USA :
- Verletzungsrate liegt bei 40 pro 100 Mio Kilometer
- Todesrate liegt bei 0.7 pro 100 Mio Kilometer

Bewertung (Kalra and Paddock, 2015): mit 100 autonomen Fahrzeugen, die 24 Stunden am Tag und 365 Tage am Jahr ohne Unfall fahren, braucht man

4 Monate (Verletzung) oder **19 Jahre** (Tod)

um zu demonstrieren, dass die Verletzungs- und Todesrate autonomer Fahrzeuge kleiner ist, als bei konventionellen Fahrzeugen.

Wegen der geringen Werten erfordert die Schätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit eine **sehr lange Beobachtungsdauer**.

Übersicht

ISO 26262 Sicherheit-Standard

Standardisierungen (Schlummer, 2014): IEC 61508 (generische Norm), ISO 26262 (Automobilbereich) sowie Verbands- und Unternehmensrichtlinien ...

ISO 26262 Sicherheit-Standard

Standardisierungen (Schlummer, 2014): IEC 61508 (generische Norm), ISO 26262 (Automobilbereich) sowie Verbands- und Unternehmensrichtlinien ...

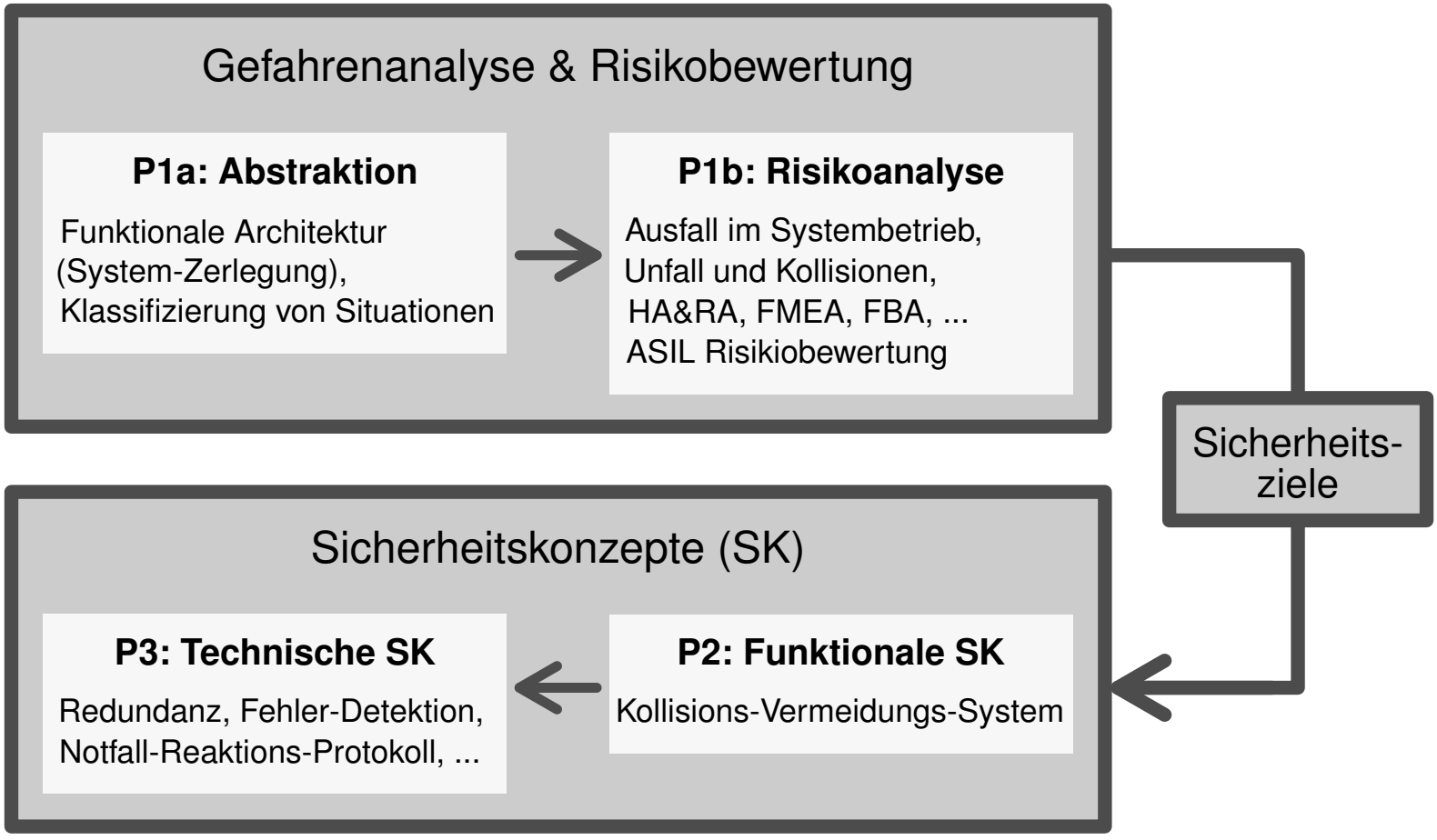
ISO 26262-3 und 26262-4: Funktionale Sicherheit der Konzept- und System-Entwicklung-Phasen der Elektrik- und Elektronik-Systeme (E/E-Systeme) im Personenkraftwagen

→ **Vollständigkeits- und Konsistenz-Problem**

Für jedes Item und jede Fahrsituation:

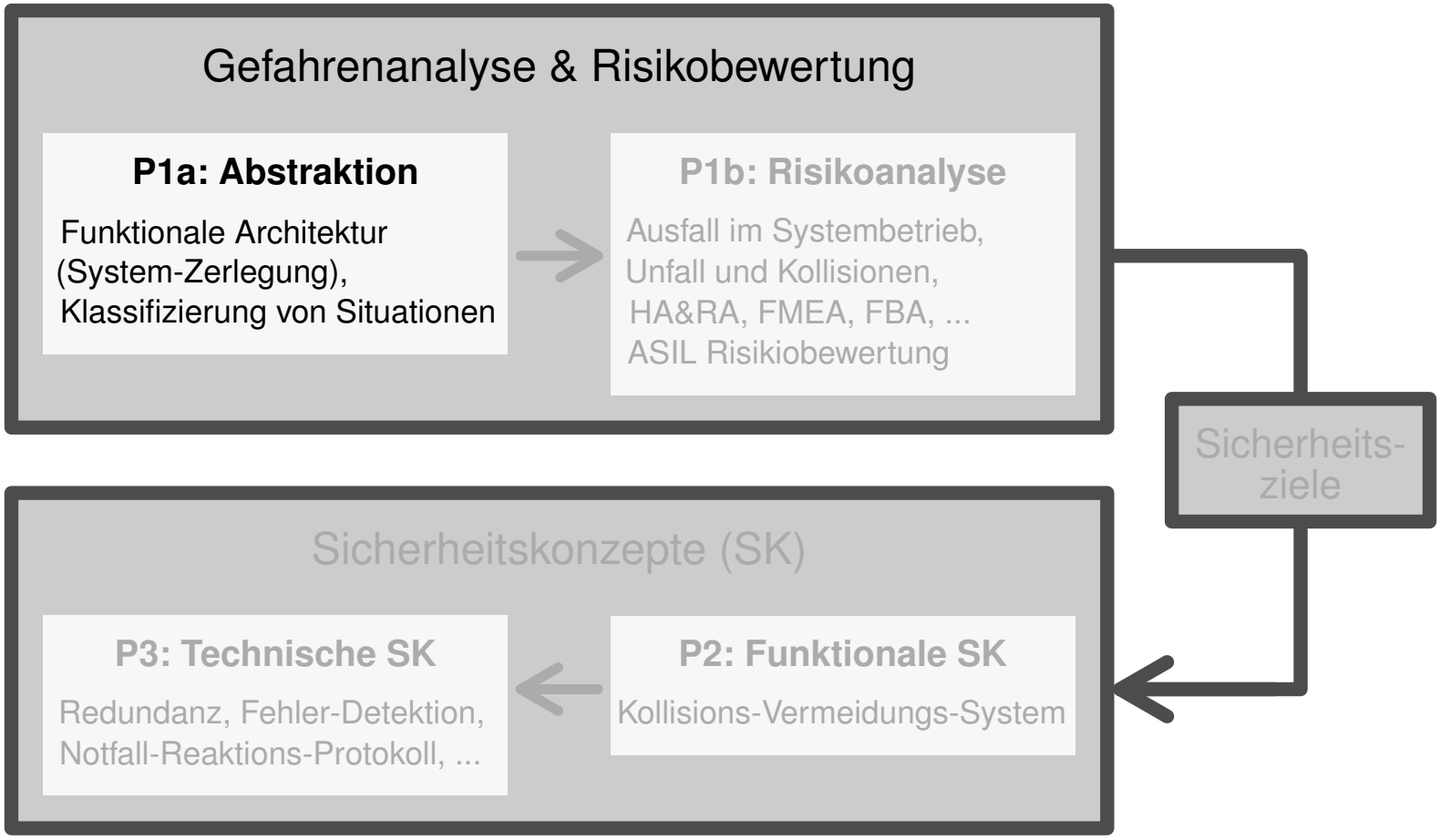
P1: Gefahrenanalyse & Risikobewertung	→	**P2:** Funktionales Sicherheitskonzept	→	**P3:** Technisches Sicherheitskonzept

ISO 26262-3 und 26262-4 bei autonomen Fahrzeugen



→ Festlegung der technischen und funktionalen Sicherheitskonzepte für alle möglichen Ereignisse, Item und Fahrsituationen, die zu Gefahren führen können.

ISO 26262-3 und 26262-4 bei autonomen Fahrzeugen



→ Festlegung der technischen und funktionalen Sicherheitskonzepte für alle möglichen Ereignisse, Item und Fahrsituationen, die zu Gefahren führen können.

Funktionale Architektur der autonomen Fahrzeuge

Die autonomen Fahrsysteme sind **auftragsbasiert** und haben eine charakteristische, **funktionale Architektur** (Behere und Torngren, 2015; Paden et al., 2016).

Funktionale Architektur der autonomen Fahrzeuge

Die autonomen Fahrsysteme sind **auftragsbasiert** und haben eine charakteristische, **funktionale Architektur** (Behere und Torngren, 2015; Paden et al., 2016).

Die **klassischen Elemente** autonomer Fahrzeugführung sind:

1. Wahrnehmung Erfassen, zusammenführen und interpretieren der Sensordaten (Radar, Kamera, ...) und Kommunikationsgeräte (V2V, V2I).

$\rightarrow$ *Virtual world*

Funktionale Architektur der autonomen Fahrzeuge

Die autonomen Fahrsysteme sind **auftragsbasiert** und haben eine charakteristische, **funktionale Architektur** (Behere und Torngren, 2015; Paden et al., 2016).

Die **klassischen Elemente** autonomer Fahrzeugführung sind:

1. **Wahrnehmung** Erfassen, zusammenführen und interpretieren der Sensordaten (Radar, Kamera, ...) und Kommunikationsgeräte (V2V, V2I).
   → *Virtual world*

2. **Bewegungsplanung** Berechnen einer kollisionsfreien, stetigen Trajektorie.
   → *Kürzester sicherer Weg*

Funktionale Architektur der autonomen Fahrzeuge

Die autonomen Fahrsysteme sind **auftragsbasiert** und haben eine charakteristische, **funktionale Architektur** (Behere und Torngren, 2015; Paden et al., 2016).

Die **klassischen Elemente** autonomer Fahrzeugführung sind:

1. Wahrnehmung Erfassen, zusammenführen und interpretieren der Sensordaten (Radar, Kamera, ...) und Kommunikationsgeräte (V2V, V2I).

→ *Virtual world*

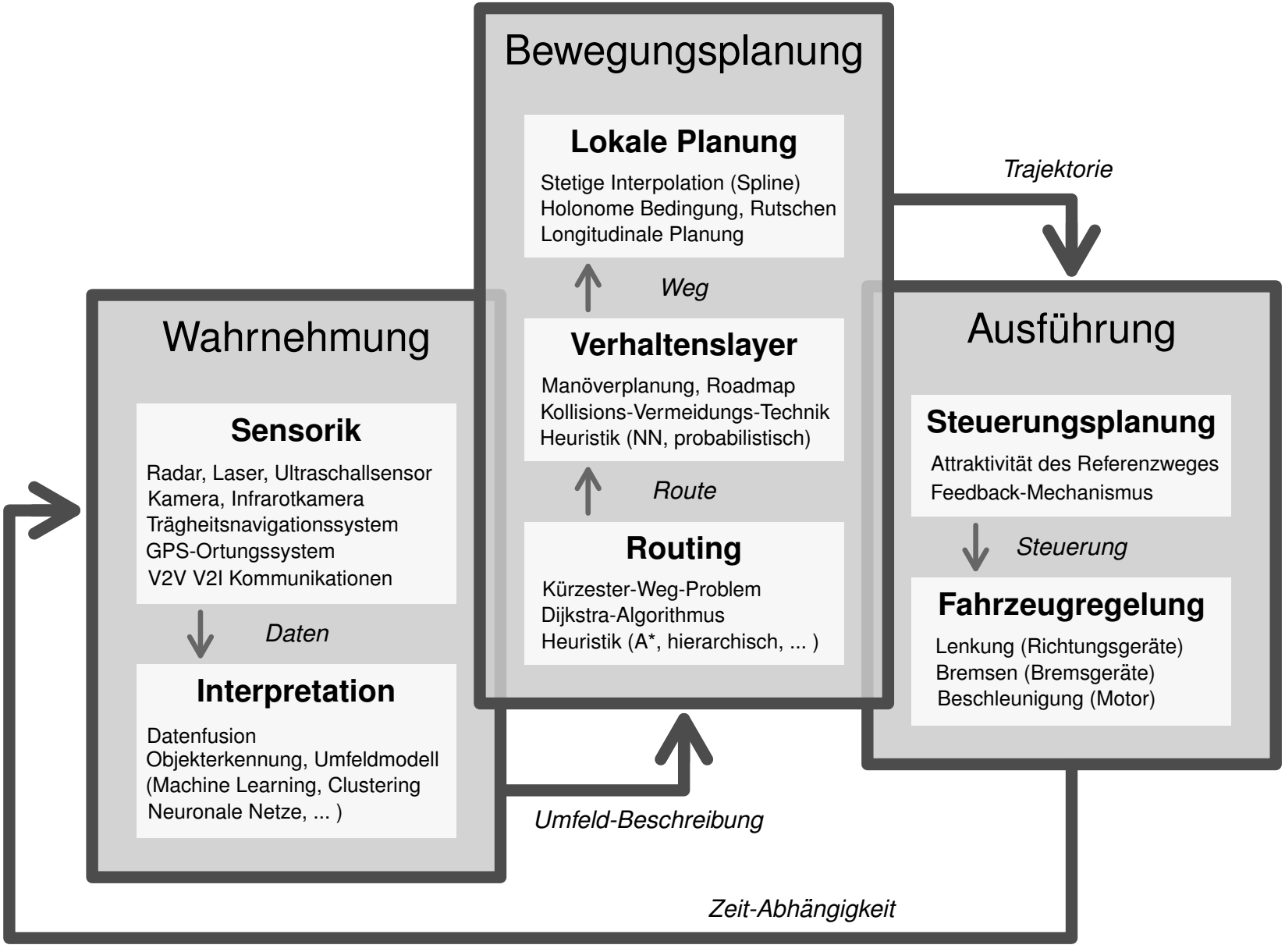
2. Bewegungsplanung Berechnen einer kollisionsfreien, stetigen Trajektorie.

→ *Kürzester sicherer Weg*

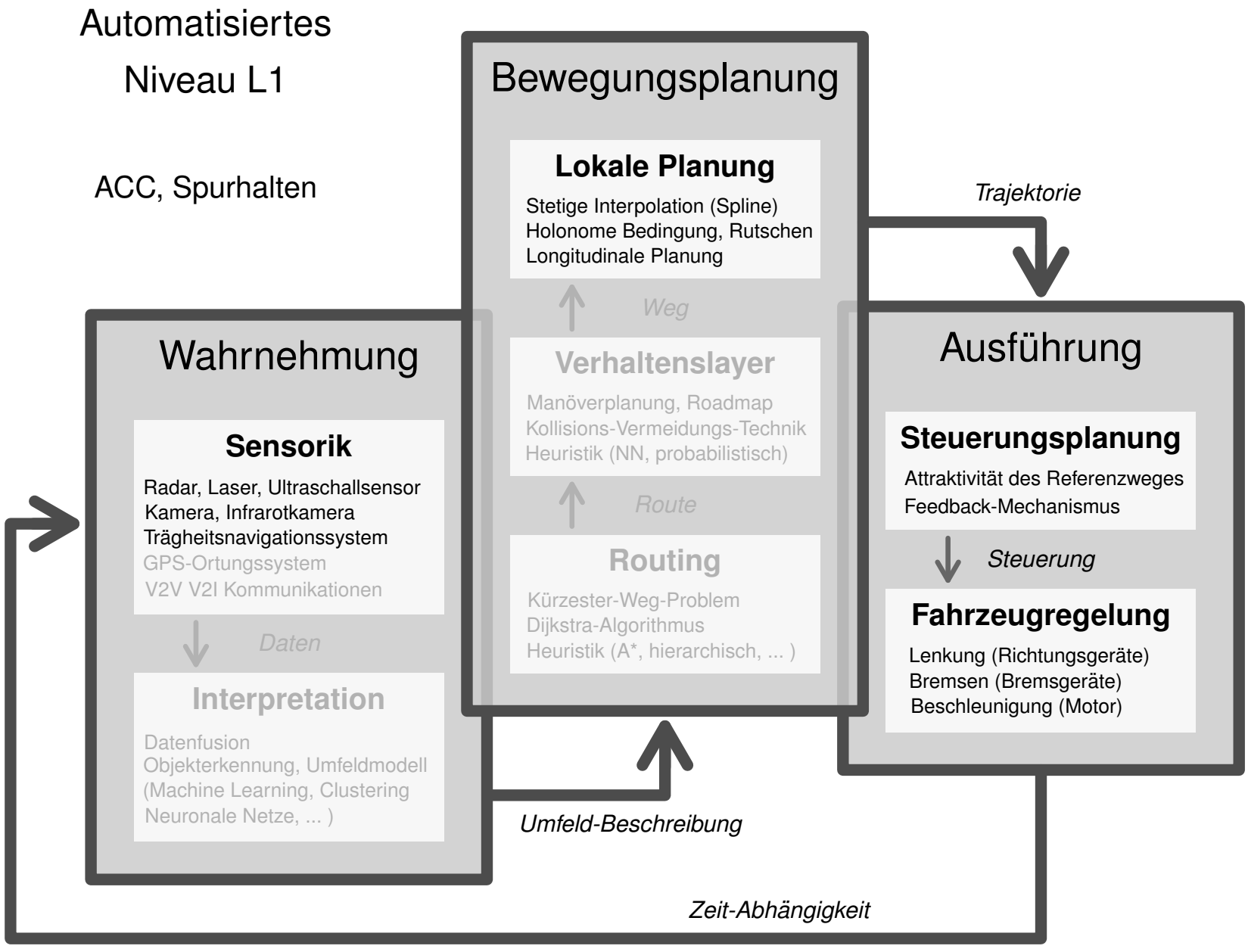
3. Ausführung Berechnen eines stabilen Steuerungs-Auftrags, sodass das automatisierte Fahrzeug der Referenz-Trajektorie folgt.

→ *Fahrzeugregelung*

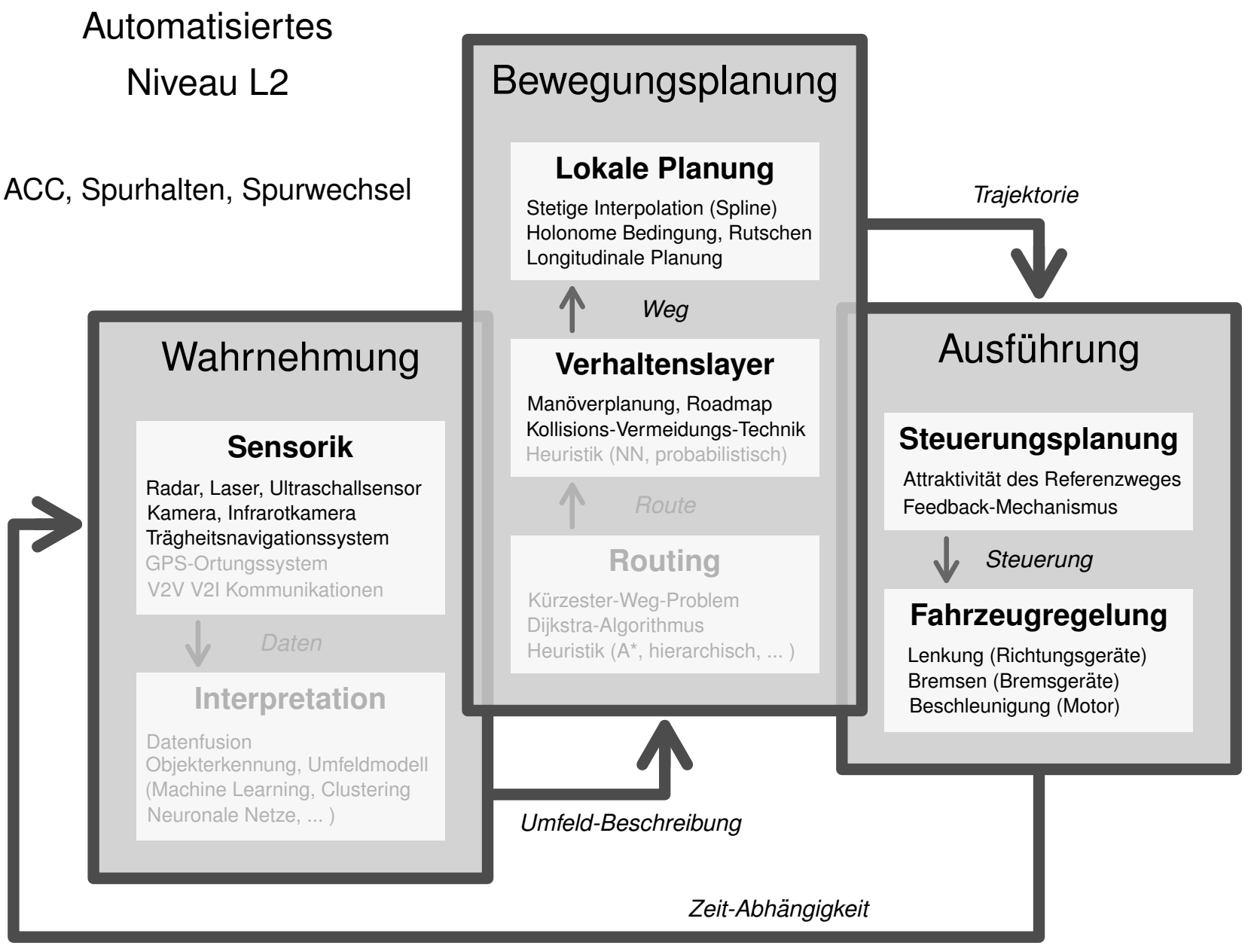
Funktionale Architektur autonomer Fahrzeuge



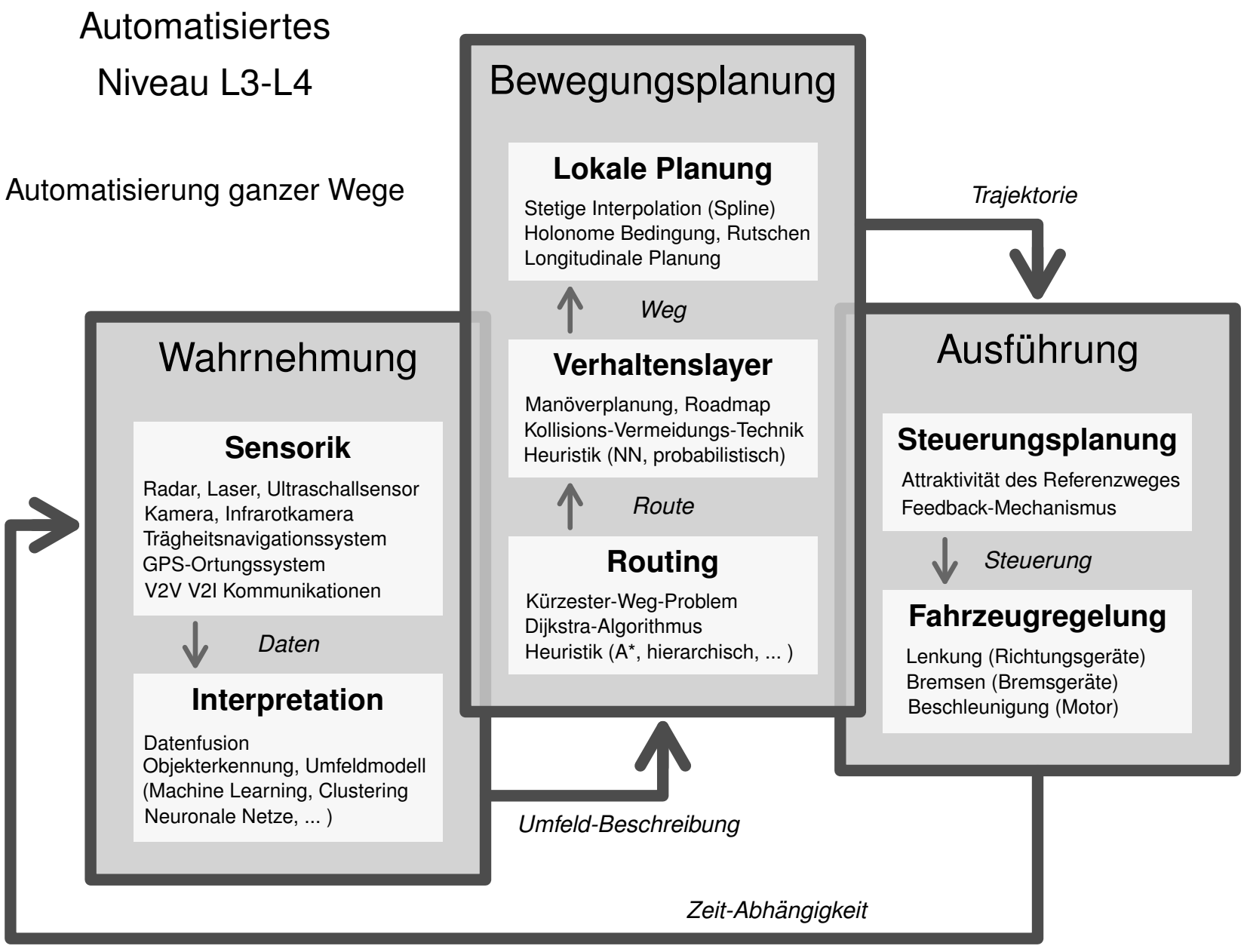
Funktionale Architektur autonomer Fahrzeuge



Funktionale Architektur autonomer Fahrzeuge



Funktionale Architektur autonomer Fahrzeuge



Klassifizierung von Fahrsituationen

Diskrete (kategorische) Beschreibung der Fahrsituationen mit charakteristischen Kenngrößen (Warg et al., 2014; Jang et al., 2015; VDA, 2015b)

- **Fahrzeug** (Geschwindigkeit, Richtung, Zustand, Modus, Manöver, ...)
- **Straße** (Straßentyp, Flächentyp, Krümmung, Neigung, ...)
- **Umgebung** (Nachbarfahrzeuge, Fußgänger, Hindernisse, ...)
- **Umwelt** (Wetter, Helligkeit, Temperatur, ...)

Klassifizierung von Fahrsituationen

Diskrete (kategorische) Beschreibung der Fahrsituationen mit charakteristischen Kenngrößen (Warg et al., 2014; Jang et al., 2015; VDA, 2015b)

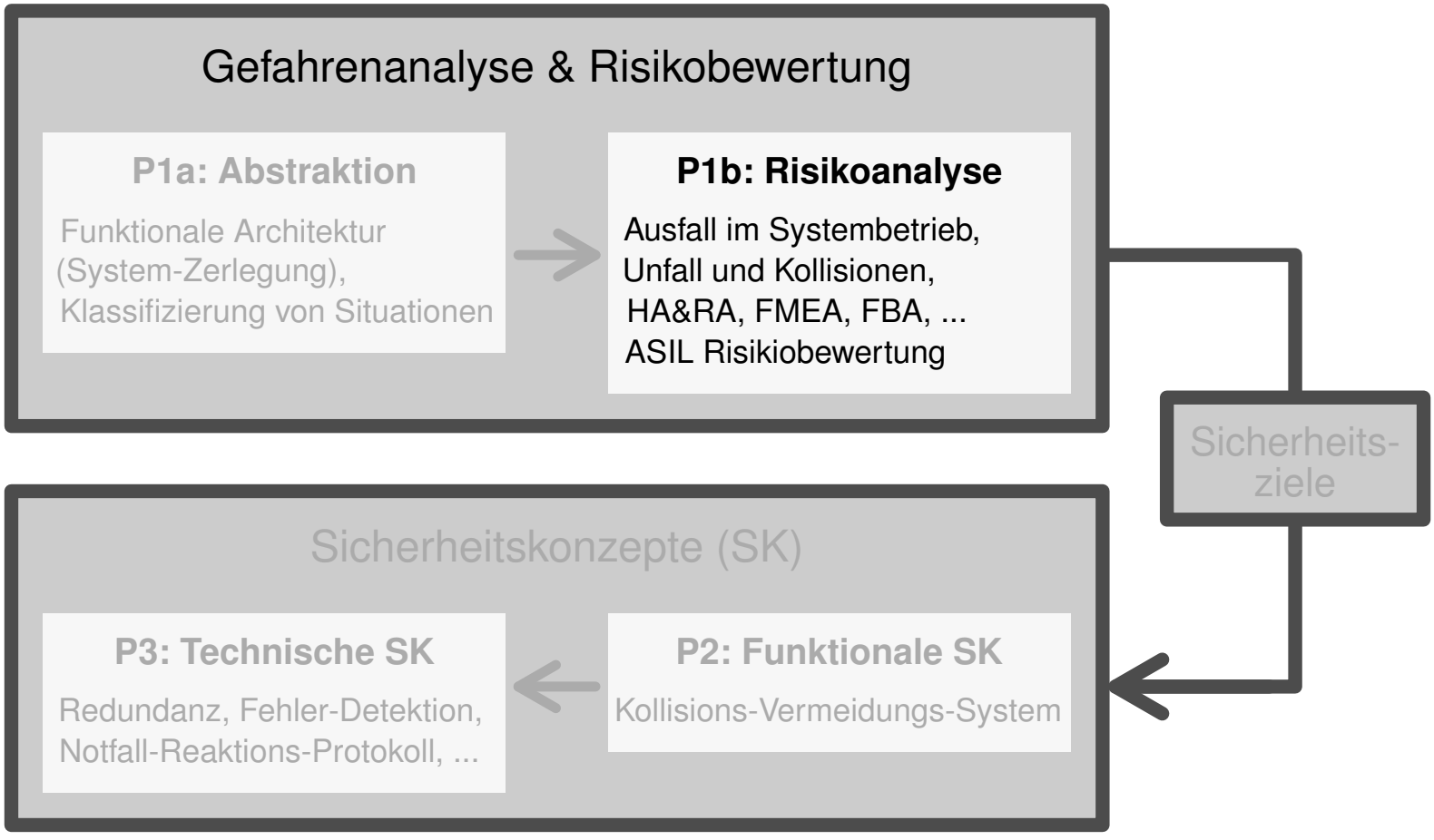
- **Fahrzeug** (Geschwindigkeit, Richtung, Zustand, Modus, Manöver, ...)
- **Straße** (Straßentyp, Flächentyp, Krümmung, Neigung, ...)
- **Umgebung** (Nachbarfahrzeuge, Fußgänger, Hindernisse, ...)
- **Umwelt** (Wetter, Helligkeit, Temperatur, ...)

Fahrsituationen und Fahrumwelt sind **zahlreich und vielfältig**. Sie können nur für **spezifische Fahrsituationen vollständig beschrieben werden**.

$\rightarrow$ Z. B. Fahrsituationen auf einer **Autobahn**: *Folgen, Spurhalten, Spurwechseln*

Fahrsituationen in der **Stadt** oder auf der **Landstraße** sind **komplexer**.

ISO 26262-3 und 26262-4 Phasen bei autonomen Fahrzeugen



→ Festlegung der technischen und funktionalen Sicherheitskonzepte für alle möglichen Ereignisse, Item und Fahrsituationen, die zu Gefahren führen können.

Risikobewertung

Ursachen einer Kollision (Lefèvre et al., 2014):

→ **Ausfall des Systems**: Ausfall der Wahrnehmung oder der Komponenten (Sensor, Computer, Steuerung) sowie Versagen der Bewegungsplanungsalgorithmen (Geschwindigkeit zu hoch oder ungeeignetes Manöver)

→ **Unerwartetes äußeres Ereignis**: Kollision aufgrund einer unerwarteten, dynamischen Entwicklung der Umgebung

Risikobewertung

Ursachen einer Kollision (Lefèvre et al., 2014):

→ **Ausfall des Systems**: Ausfall der Wahrnehmung oder der Komponenten (Sensor, Computer, Steuerung) sowie Versagen der Bewegungsplanungsalgorithmen (Geschwindigkeit zu hoch oder ungeeignetes Manöver)

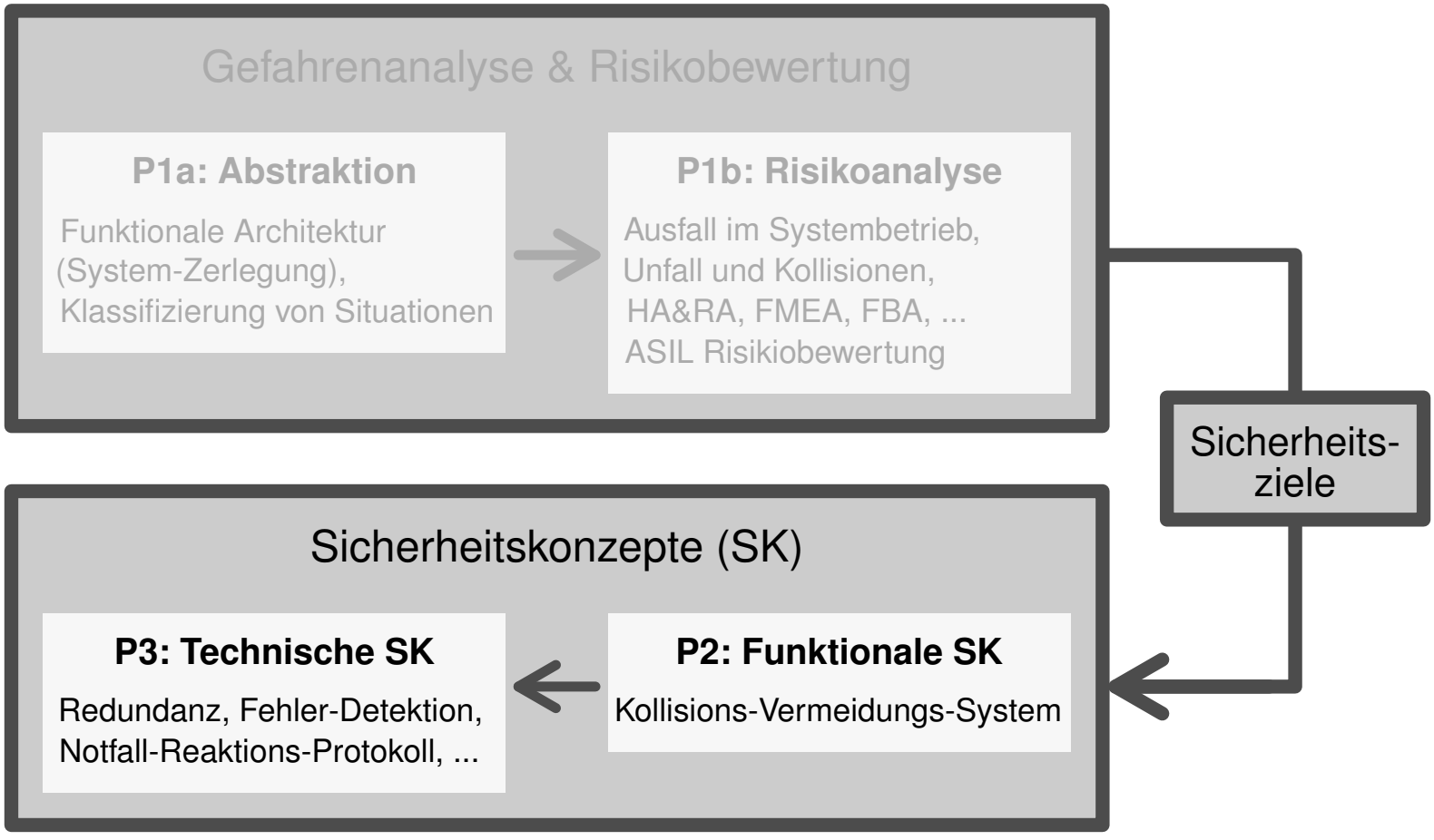
→ **Unerwartetes äußeres Ereignis**: Kollision aufgrund einer unerwarteten, dynamischen Entwicklung der Umgebung

Risiko-Klassifikation:

$$\text{ASIL} = F(S, E, C)$$

- S : **Schadensausmaß** (Severity)
  Hängt von Geschwindigkeit und Kollisionstyp (z. B. vorher: S=++; hinter: S=+)
- E : **Wahrscheinlichkeit der Exposition** (Exposure)
  Systemausfall: Betriebssicherheitsanalyse – Kollision: Modelle und Simulation
- C : **Kontrollierbarkeit der Gefahren** (Controlliability)

ISO 26262-3 und 26262-4 Phasen bei autonomen Fahrzeugen



→ Festlegung der technischen und funktionalen Sicherheitskonzepte für alle möglichen Ereignisse, Item und Fahrsituationen, die zu Gefahren führen können.

Sicherheitsziele und Sicherheitskonzepte

Sicherheitsziel: *Einschränkung der Kollision-Möglichkeit*

Sicherheitskonzept: *Kollisions-Vermeidungs-Systeme*

Teil *C* ‘Kontrollierbarkeit der Gefahren’ der ASIL Risiko-Klassifizierung

Sicherheitsziele und Sicherheitskonzepte

Sicherheitsziel: *Einschränkung der Kollision-Möglichkeit*

Sicherheitskonzept: *Kollisions-Vermeidungs-Systeme*

Teil *C* 'Kontrollierbarkeit der Gefahren' der ASIL Risiko-Klassifizierung

Beispiele statischer technischer Sicherheitskonzepte

- **Notfallprotokoll** | Systemausfall: Ausfalldetektion, Notfallbremsprotokoll
  Unerwartetes Hindernis: Notfallvermeidungsprotokoll (*reaktive Kontrolle*, Binfet-Kull et al. 1998).
- **Analyse der Fahrsituationen** | Einsetzen sicheren Bedingungen für jedes Manöver (mathematische Kriterien).
- **Redundanz** | Wahrnehmung (Sensor/Kamera/GPS/Karte-Daten-Fusionsprüfung),
  Bewegungsplanung (Benutzung mehrerer Planer),
  Ausführung (z. B. Lenkung durch Bremsen).

Übersicht

Funktionale Sicherheit bei autonomen Fahrzeugen

Hauptmerkmal autonomer Fahrzeuge (Warg et al., 2015):

- *Normales Fahrzeug:* **Fahrer ist verantwortlich** für die Fahrzeugkontrolle.
- *Autonomes Fahrzeug:* **Fahrsystem ist verantwortlich**.

→ **Eine vollständige Analyse aller Betriebszeiten** autonomer Fahrzeuge mit hohen Automatisierung-Niveau L3-L4 ist **sehr schwierig**.[1]

[1] Warg et al., 2014; Bergenhem et al., 2015; Johansson, 2016; Koopman und Wagner, 2016.

Funktionale Sicherheit bei autonomen Fahrzeugen

Hauptmerkmal autonomer Fahrzeuge (Warg et al., 2015):

- *Normales Fahrzeug:* **Fahrer ist verantwortlich** für die Fahrzeugkontrolle.
- *Autonomes Fahrzeug:* **Fahrsystem ist verantwortlich**.

→ **Eine vollständige Analyse aller Betriebszeiten** autonomer Fahrzeuge mit hohen Automatisierung-Niveau L3-L4 ist **sehr schwierig**.[1]

"The higher complexity and the partly implicit definition of the tasks [of autonomous vehicles] *for the E/E systems will make it harder to argue completeness and correctness of the safety requirements in each phase of the ISO 26262 lifecycle."* (Bergenhem et al., 2015).

"Vehicle-level testing won't be enough to ensure safety. It has long been known that it is infeasible to test systems thoroughly enough to ensure ultra-dependable system operation. [...] *Thus, alternate methods of validation are required, potentially including approaches such as simulation or formal proofs"* (Koopman und Wagner, 2016).

[1] Warg et al., 2014; Bergenhem et al., 2015; Johansson, 2016; Koopman und Wagner, 2016.

Dynamische Sicherheitsanalyse bei autonomen Fahrzeugen

Entwicklung spezifischer Sicherheitsanalyse-Werkzeuge, die die **vielfältigen dynamischen Aspekte** des autonomen Fahrens berücksichtigen.

- Arbeit-Gruppe *safety of the intended function (SoTIF)* bei der Revision des ISO 26262 Standards.
- Weiterentwicklung der **dynamischen Zuverlässigkeit** und Etablierung einer **Zuverlässigkeitskultur Automotive** (Braasch und Meyna, 2015).

Dynamische Sicherheitsanalyse bei autonomen Fahrzeugen

Entwicklung spezifischer Sicherheitsanalyse-Werkzeuge, die die **vielfältigen dynamischen Aspekte** des autonomen Fahrens berücksichtigen.

- Arbeit-Gruppe *safety of the intended function (SoTIF)* bei der Revision des ISO 26262 Standards.
- Weiterentwicklung der **dynamischen Zuverlässigkeit** und Etablierung einer **Zuverlässigkeitskultur Automotive** (Braasch und Meyna, 2015).

→ **Dynamische Bewertung der Sicherheit** mit zeitlichen Kenngrößen wie **Time-to-Collision**, **Time-to-React** oder **Time-Gap** (Tamke et al., 2011; Berthelot et al., 2012)

→ Dynamische Detektion **ungewöhnlicher Ereignisse** oder **konfliktgeladener Manöver** (Lefèvre et al., 2014)

→ **Mathematische Analyse** der Kollisionsmöglichkeiten; Entwicklung **robuster, kollisionsfreier Modelle und Vermeidungsstrategien** (Zhou und Peng, 2005)

→ **Dynamische Trajektorien-Vorhersage** und **Simulations-Analyse** (Eidehall und Petersson, 2008; Ammoud et al., 2009; Chen und Chen, 2010; P. Olivares et al., 2016)

Übersicht

Funktionale Sicherheit bei Autonomen Fahrzeugen

- **L1-L2 Automatisierungs-Niveau** (Assistenzsysteme und Teilautomatisierung)

> Betriebssicherheit des Systems und Klassifizierung der Fahrsituationen $\rightarrow$ Risiko-analyse und -bewertung $\rightarrow$ Sicherheitskonzepte.
>
> *ISO 26262-3/4 Vollständigkeits-Problem*.

Funktionale Sicherheit bei Autonomen Fahrzeugen

- **L1-L2 Automatisierungs-Niveau** (Assistenzsysteme und Teilautomatisierung)

Betriebssicherheit des Systems und Klassifizierung der Fahrsituationen → Risiko-analyse und -bewertung → Sicherheitskonzepte.

ISO 26262-3/4 Vollständigkeits-Problem.

- **L3-L4 Automatisierungs-Niveau** (Hoch- und Vollautomatisierung)

Abstraktion des Systems → Betriebssicherheit des *simplifizierten* Systems und *Schematische* Klassifizierung der Situationen → *Statische* Risikoanalyse und -bewertung → *Statische* Sicherheitskonzepte

Funktionale Sicherheit bei Autonomen Fahrzeugen

- **L1-L2 Automatisierungs-Niveau** (Assistenzsysteme und Teilautomatisierung)

Betriebssicherheit des Systems und Klassifizierung der Fahrsituationen → Risiko-analyse und -bewertung → Sicherheitskonzepte.

ISO 26262-3/4 Vollständigkeits-Problem.

- **L3-L4 Automatisierungs-Niveau** (Hoch- und Vollautomatisierung)

Abstraktion des Systems → Betriebssicherheit des *simplifizierten* Systems und *Schematische* Klassifizierung der Situationen → *Statische* Risikoanalyse und -bewertung → *Statische* Sicherheitskonzepte

\+ **Dynamische Sicherheitsanalyse**

Weiterentwicklung

- **Analyse der Struktur** der autonomen Fahrsysteme, ganzheitliche Systembetrachtung, und Betriebssicherheitsanalyse

Weiterentwicklung

- **Analyse der Struktur** der autonomen Fahrsysteme, ganzheitliche System-betrachtung, und Betriebssicherheitsanalyse
- Entwicklung, Test und Validierung der **Redundanz-Sicherheitstechnik** für die Wahrnehmung, die Bewegungsplanung und die Ausführungs-Phasen

Weiterentwicklung

- **Analyse der Struktur** der autonomen Fahrsysteme, ganzheitliche System-betrachtung, und Betriebssicherheitsanalyse
- Entwicklung, Test und Validierung der **Redundanz-Sicherheitstechnik** für die Wahrnehmung, die Bewegungsplanung und die Ausführungs-Phasen
- Bewertung der **dynamischen Methoden** für die Prädiktion und Vermeidung von Kollisionen und die Sicherheits-bewertung in Echtzeit (TTC, TTR, Detektion gefährlicher Situationen und Manöver)

Weiterentwicklung

- **Analyse der Struktur** der autonomen Fahrsysteme, ganzheitliche System-betrachtung, und Betriebssicherheitsanalyse
- Entwicklung, Test und Validierung der **Redundanz-Sicherheitstechnik** für die Wahrnehmung, die Bewegungsplanung und die Ausführungs-Phasen
- Bewertung der **dynamischen Methoden** für die Prädiktion und Vermeidung von Kollisionen und die Sicherheits-bewertung in Echtzeit (TTC, TTR, Detektion gefährlicher Situationen und Manöver)
- **Mathematischer Methoden** für eine stabile und kollisionsfreie Dynamik (Stabilität- und Homogenisierungs-Technik)

Weiterentwicklung

- **Analyse der Struktur** der autonomen Fahrsysteme, ganzheitliche System-betrachtung, und Betriebssicherheitsanalyse
- Entwicklung, Test und Validierung der **Redundanz-Sicherheitstechnik** für die Wahrnehmung, die Bewegungsplanung und die Ausführungs-Phasen
- Bewertung der **dynamischen Methoden** für die Prädiktion und Vermeidung von Kollisionen und die Sicherheits-bewertung in Echtzeit (TTC, TTR, Detektion gefährlicher Situationen und Manöver)
- **Mathematischer Methoden** für eine stabile und kollisionsfreie Dynamik (Stabilität- und Homogenisierungs-Technik)
- **Simulationstechnik** (numerische Analyse, Monte-Carlo-Methode)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Referenzen

1. VDA. Automation – From Driver Assistance Systems to Automated Driving. *Technical report*, Verband der Automobilindustrie, 2015
2. BASt. Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. *Forschung kompakt* 11/12, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2012.
3. S. Singh. Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey. *Technical report* No. DOT HS 812 115, National Highway Traffic Safety Administration, 2014.
4. S. Lefèvre, D. Vasquez, und C. Laugier. A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles. *ROBOMECH Journal*, 1(1):1–14, 2014.
5. N. Kalra und S.M. Paddock. Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? *Technical report*, RAND Corporation, 2015.
6. ISO 26262:2011. Road vehicles – Functional safety. *Standard*, International Organization for Standardization, 2011.

Referenzen

7. M. Schlummer. Herausforderungen der Funktionalen Sicherheit im Automobilbereich. *104. Sicherheitswissenschaftlichen Kolloquium*, Wuppertal, 2014.
8. S. Behere und M. Torngren. A functional architecture for autonomous driving. In *Workshop on Automotive Software Architecture Proceedings*, pages 3–10, 2015.
9. B. Paden, M. Cáp, S. Zheng Yong, D. Yershov, und E. Frazzoli. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1(1):33-55, 2016.
10. VDA 702. Situationskatalog E-parameter nach ISO 26262-3. *Technical report*, Verband der Automobilindustrie, 2015b.
11. H. Jang, H. Kwon, S.-H. Hong, und M. Lee. A Study on Situation Analysis for ASIL Determination. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, 3(2):152–157, 2015.

Referenzen

12. F. Warg, M. Gassilewski, J. Tryggvesson, V. Izosimov, A. Werneman, und R. Johansson. Defining autonomous functions using iterative hazard analysis and requirements refinement. In *SAFECOMP Workshops Proceedings*, pages 286–297. Springer, 2014.
13. M. Binfet-Kull, P. Heitmann, und C. Ameling. System safety for an autonomous driving vehicle. In *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, pages 469–476, 1998.
14. P. Koopman und M. Wagner. Challenges in autonomous vehicle testing and validation. *SAE Int. J. Trans. Safety*, 4:15–24, 2016.
15. C. Bergenhem, R. Johansson, A. Söderberg, J. Nilsson, J. Tryggvesson, M. Törngren, und S. Ursing. How to reach complete safety requirement refinement for autonomous vehicles. In *Critical Automotive applications: Robustness & Safety Proceedings*, 2015.
16. R. Johansson. Efficient Identification of Safety Goals in the Automotive E/E Domain. In *8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems Proceedings*, 2016.

Referenzen

17. ISO/AWI PAS 21448. Road vehicles – Safety of the intended functionality. *Technical report* (under development), International Organization for Standardization, 2016.
18. A. Braasch und A. Meyna. Technischen Zuverlässigkeit – Sicherheitsbewertung von Autonomen Fahrzeugen. *3. Wuppertaler Sicherheitstag*, Wuppertal, 2015
19. A. Tamke, T. Dang, und G. Breuel. A flexible method for criticality assessment in driver assistance systems. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 697–702, 2011.
20. A. Berthelot, A. Tamke, T. Dang, und G. Breuel. A novel approach for the probabilistic computation of time-to-collision. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 1173–1178, 2012.
21. J. Zhou und H. Peng. Range policy of adaptive cruise control vehicles for improved flow stability and string stability. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 6(2):229–237, 2005.

Referenzen

22. S. Ammoun und F. Nashashibi. Real time trajectory prediction for collision risk estimation between vehicles. In *IEEE Intelligent Computer Communication and Processing*, pages 417–422, 2009.
23. A. Eidehall und L. Petersson. Statistical threat assessment for general road scenes using monte carlo sampling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(1):137–147, 2008.
24. F. Chen und S. Chen. Simulation-based assessment of vehicle safety behavior under hazardous driving conditions. *Journal of Transportation Engineering*, 136(4):304–315, 2010.
25. P. Olivares, N. Rebernik, A. Eichberger, und E. Stadlober. Virtual stochastic testing of advanced driver assistance systems. In *Advanced Microsystems for Automotive Applications*, pages 25–35. Springer, 2016.

Empirische Bewertung der Ausfallrate

- p ist die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls pro Distanzeinheit bei AF.
- p_0 ist die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls beim realen Verkehr.

D ist die zurückgelegte Wegstrecke ohne Unfall, die geometrisch mit dem Parameter p verteilt ist. Damit ist $P(D \leq n) = 1 - (1-p)^n$.

Wir testen
$$H_0 = \{p \geq p_0\}.$$
Für eine gegebene zurückgelegte Wegstrecke n lehnen wir H_0 für $R_n = \{D > n\}$ ab.

Die Wahrscheinlichkeit einer Falsch-positive ist dann
$$P_{H_0}(R_n) = 1 - P_{H_0}(D \leq n) \leq 1 - P_{p=p_0}(D \leq n) = (1-p_0)^n = \alpha.$$

So können wir mit einem Konfidenzniveau $1-\alpha$ sagen, dass $p < p_0$, wenn
$$n \geq \frac{\ln(\alpha)}{\ln(1-p_0)}.$$

Beispiel: Fahrsituationenkategorie (H. Jang et al., 2015)

Factor	Sub-factor	Element	State
Vehicle	Driving Speed		Very Slow, Slow, Normal and Fast
	External Attachment		Without/with external attachment
	Operational Mode		Driving, Parking, Fuelling, Repairing
	Maneuver	Engine	On, Off
		Velocity	Accelerating, Constant, Decelerating
		Direction	Lane Keeping, Lane Changing, Turning
		Movement	Stop, Forward, Backward
Road	Linearity		Straight, Curved
	Slope		Plain, Sloped
	Layout		Invisible (blocked) , Visible (unblocked)
	Coarseness		Paved, Unpaved, Troublesome
	Nearby Elements	Obstacle	Clean, Obstacle
		Traffic	Smooth flow, Congestion
		Pedestrians	No, A Few, Many
Environment	Surface		Clear, Water (by rain etc), Snow/Ice
	Visibility		Dark, Bright, Foggy
	Temperature		Low, Medium, High
	Momentum		Windy, Calm