

# Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp



## Vorlesungsübersicht

<b>01 Einführung</b> 28.04.2022 – Prof. Lienkamp	<b>01 Einführung</b> 28.04.2022 – Prof. Lienkamp	<b>01 Übung Einführung</b> 28.04.2022 – Hoffmann
<b>02 Sensorik / Wahrnehmung I</b> 05.05.2022 – Prof. Lienkamp	<b>02 Sensorik / Wahrnehmung I</b> 05.05.2022 – Prof. Lienkamp	<b>02 Sensorik / Wahrnehmung I</b> 05.05.2022 – Prof. Lienkamp
<b>03 Sensorik / Wahrnehmung II</b> 12.05.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	<b>03 Sensorik / Wahrnehmung II</b> 12.05.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	<b>03 Übung Sensorik / Wahrnehmung II</b> 12.05.2022 – Schimpe
<b>04 Sensorik / Wahrnehmung III</b> 19.05.2022 – Schimpe	<b>04 Sensorik / Wahrnehmung III</b> 19.05.2022 – Schimpe	<b>04 Übung Sensorik / Wahrnehmung III</b> 19.05.2022 – Schimpe
<b>05 Funktionslogik / Regelung</b> 02.06.2022 – Dr.-Ing. Winkler	<b>05 Funktionslogik / Regelung</b> 02.06.2022 – Dr.-Ing. Winkler	<b>05 Funktionslogik / Regelung</b> 02.06.2022 – Dr.-Ing. Winkler
<b>06 Übung Funktionslogik / Regelung</b> 09.06.2022 – Dr.-Ing. Winkler	<b>06 Funktionale Systemarchitektur</b> 09.06.2022 – Prof. Lienkamp	<b>06 Aktorik</b> 09.06.2022 – Prof. Lienkamp
<b>07 Deep Learning</b> 23.06.2022 – Majstorovic	<b>07 Deep Learning</b> 23.06.2022 – Majstorovic	<b>07 Übung Deep Learning</b> 23.06.2022 – Majstorovic
<b>08 MMI</b> 30.06.2022 – Prof. Bengler	<b>08 MMI</b> 30.06.2022 – Prof. Bengler	<b>08 MMI Übung</b> 30.06.2022 – Prof. Bengler
<b>09 Controllability</b> 07.07.2022 – Prof. Bengler	<b>09 Controllability</b> 07.07.2022 – Prof. Bengler	<b>09 Übung Controllability</b> 07.07.2022 – Winkle
<b>10 Entwicklungsprozess</b> 14.07.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	<b>10 Entwicklungsprozess</b> 14.07.2022 – Dr.-Ing. Diermeyer	<b>10 Übung Entwicklungsprozess</b> 14.07.2022 – Hoffmann
<b>11 Analyse und Bewertung FAS</b> 21.07.2022 – Dr.-Ing. Feig	<b>11 Analyse und Bewertung FAS</b> 21.07.2022 – Dr.-Ing. Feig	<b>11 Übung Analyse und Bewertung FAS</b> 21.07.2022 – Dr.-Ing. Feig
<b>12 Aktuelle und künftige Systeme</b> 28.07.2022 – Prof. Lienkamp	<b>12 Aktuelle und künftige Systeme</b> 28.07.2022 – Prof. Lienkamp	<b>12 Aktuelle und künftige Systeme</b> 28.07.2022 – Prof. Lienkamp

# Leitfragen

## 06 – Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

- Aus welchen Bausteinen besteht die funktionale Systemarchitektur automatisierter Fahrfunktionen – und wie unterscheiden sich deren einzelne Bestandteile?

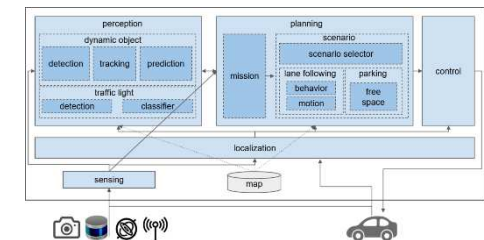
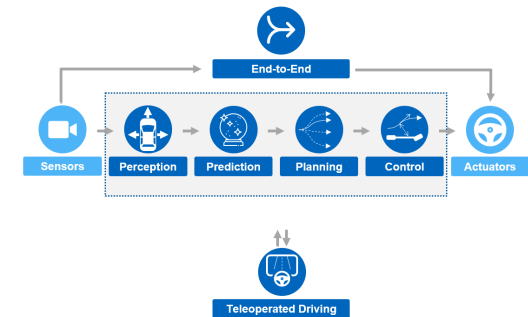
自动驾驶功能的系统架构由哪些构件组成？

- Wie lässt sich die Aufgabe der Planung unterteilen und welche Ansätze gibt es hierfür?

如何对规划任务进行分类，有哪些方法？

- 当前和未来的执行器概念是如何工作的？

- Wie funktionieren aktuelle und zukünftige Aktorik-Konzepte?



[2]

# Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
(Domagoj Majstorovic, M.Sc.)

## Agenda

### 6 Funktionale Systemarchitektur und ~~Aktorik~~

#### 6.1 Überblick Funktionale Systemarchitektur

##### 6.1.1 ACC / HC

##### 6.1.2 Beispiele Systemarchitektur

#### 6.2 Planung

##### 6.2.1 Situationserfassung / -interpretation

##### 6.2.2 Verhaltensgenerierung

### ~~6.3 Aktorik~~



# Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
(Domagoj Majstorovic, M.Sc.)

## Agenda

### 6 Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

#### 6.1 Überblick Funktionale Systemarchitektur

##### 6.1.1 ACC / HC

##### 6.1.2 Beispiele Systemarchitektur

#### 6.2 Planung

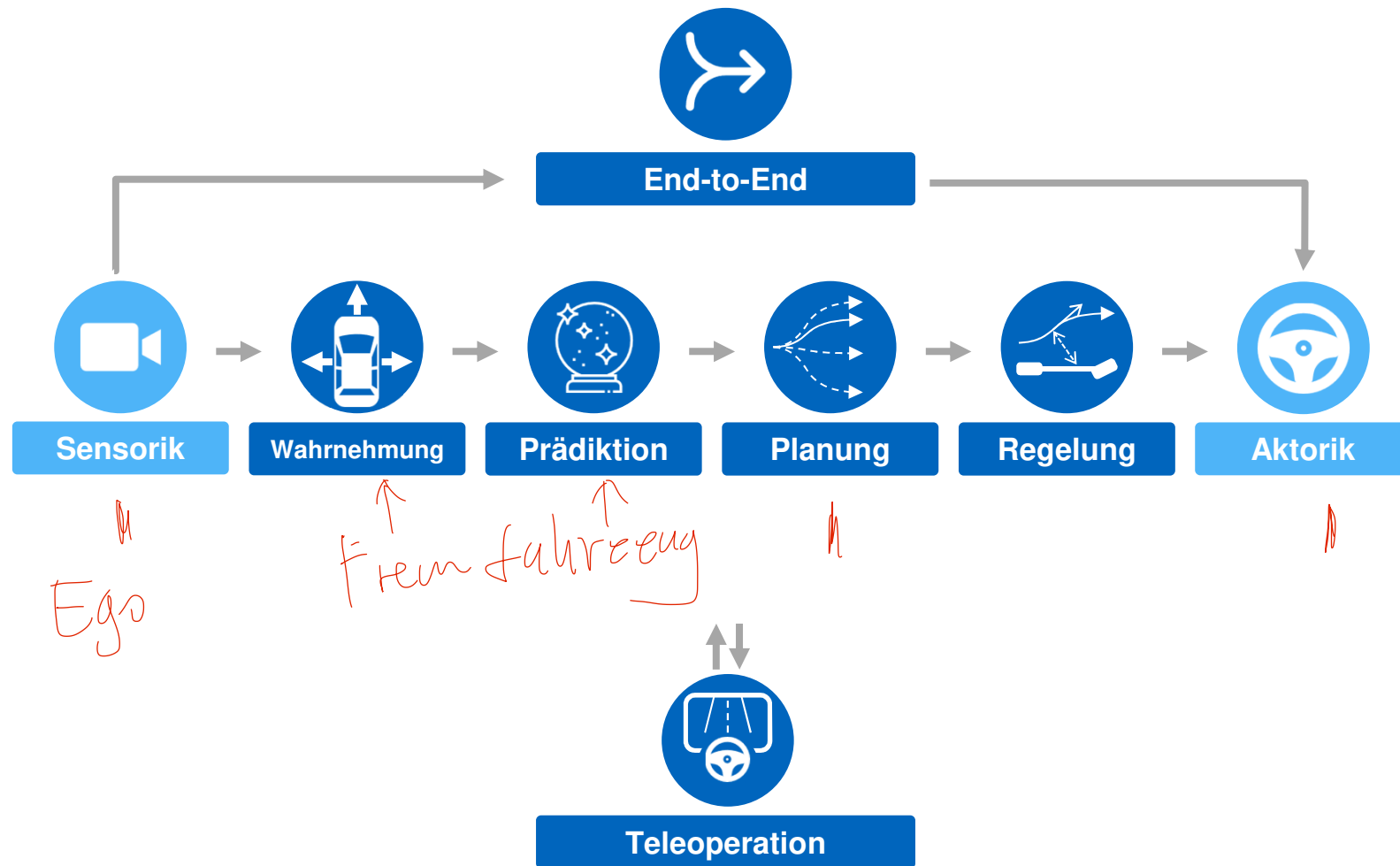
##### 6.2.1 Situationserfassung / -interpretation

##### 6.2.2 Verhaltensgenerierung

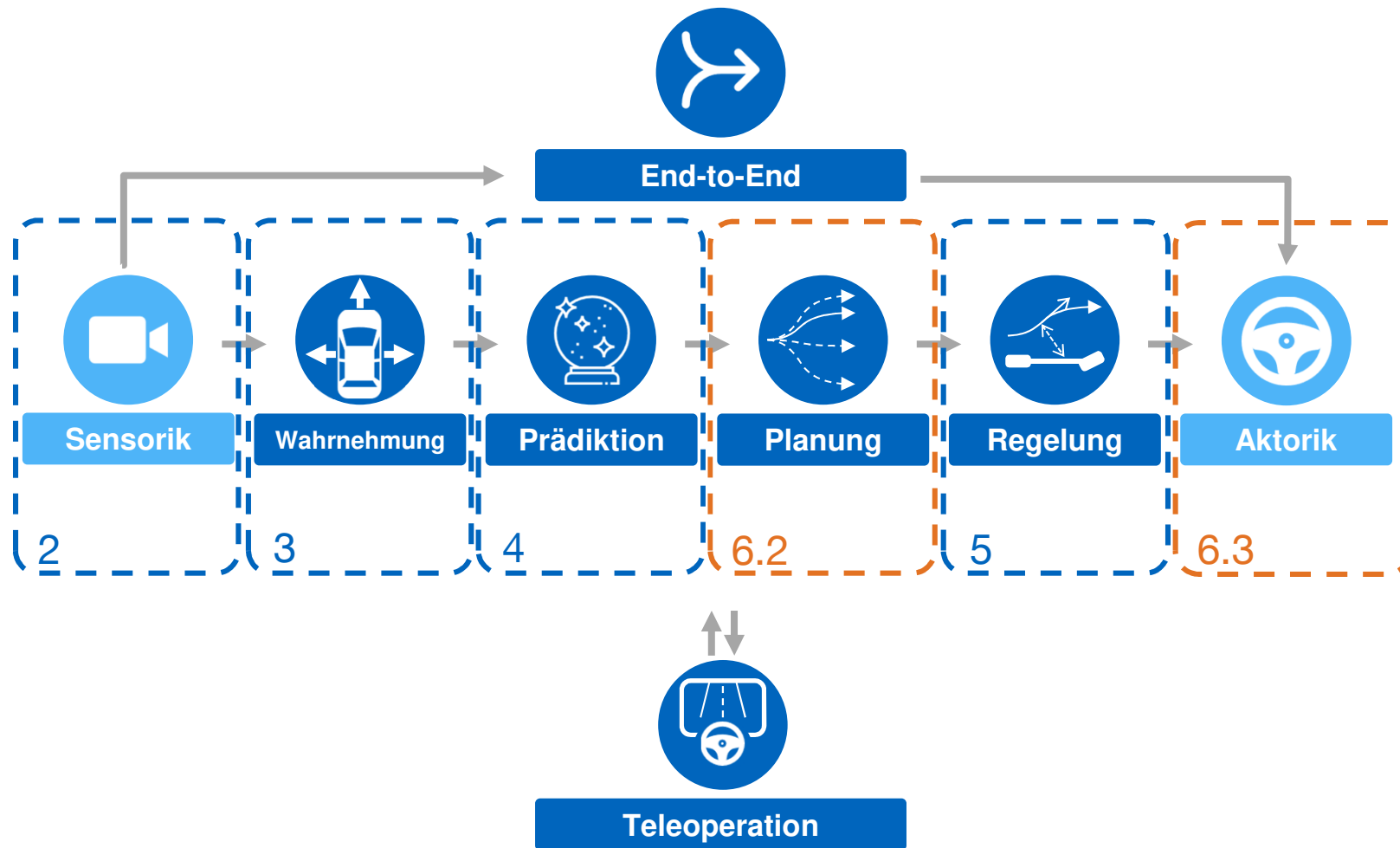
#### 6.3 Aktorik



# Einordnung | „Sense-Plan-Act“ Architektur



# Einordnung | „Sense-Plan-Act“ Architektur



# Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
(Domagoj Majstorovic, M.Sc.)

## Agenda

### 6 Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

#### 6.1 Überblick Funktionale Systemarchitektur

##### 6.1.1 ACC / HC

##### 6.1.2 Automatisiertes Fahren

#### 6.2 Planung

##### 6.2.1 Situationserfassung / -interpretation

##### 6.2.2 Verhaltensgenerierung

#### 6.3 Aktorik





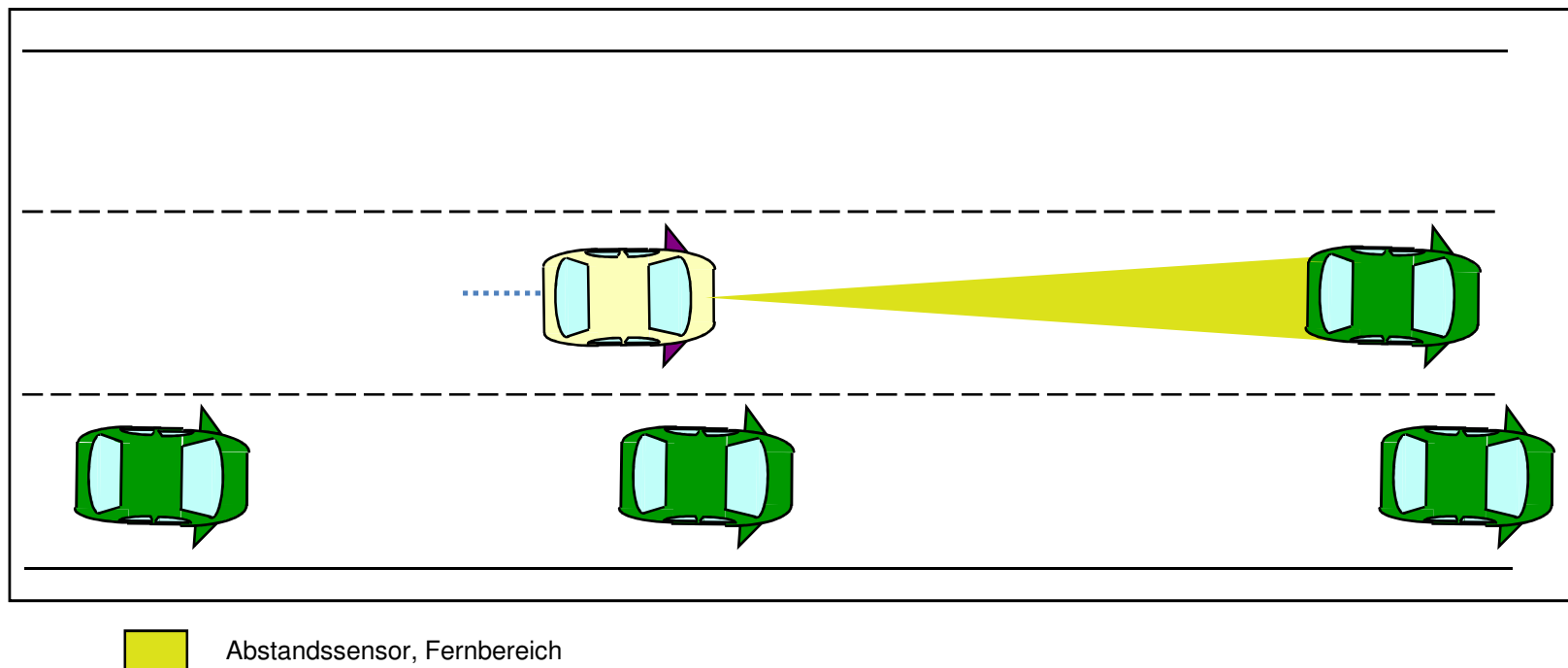
# ACC (Adaptive Cruise Control)

情况:

## Situation:

车辆检测到传感器范围内有物体，但之前已安全行驶

Fahrzeug erfasst nach vorheriger Freifahrt ein Objekt im Sensorbereich



Maurer, TUBS

# Funktionslogik für ACC

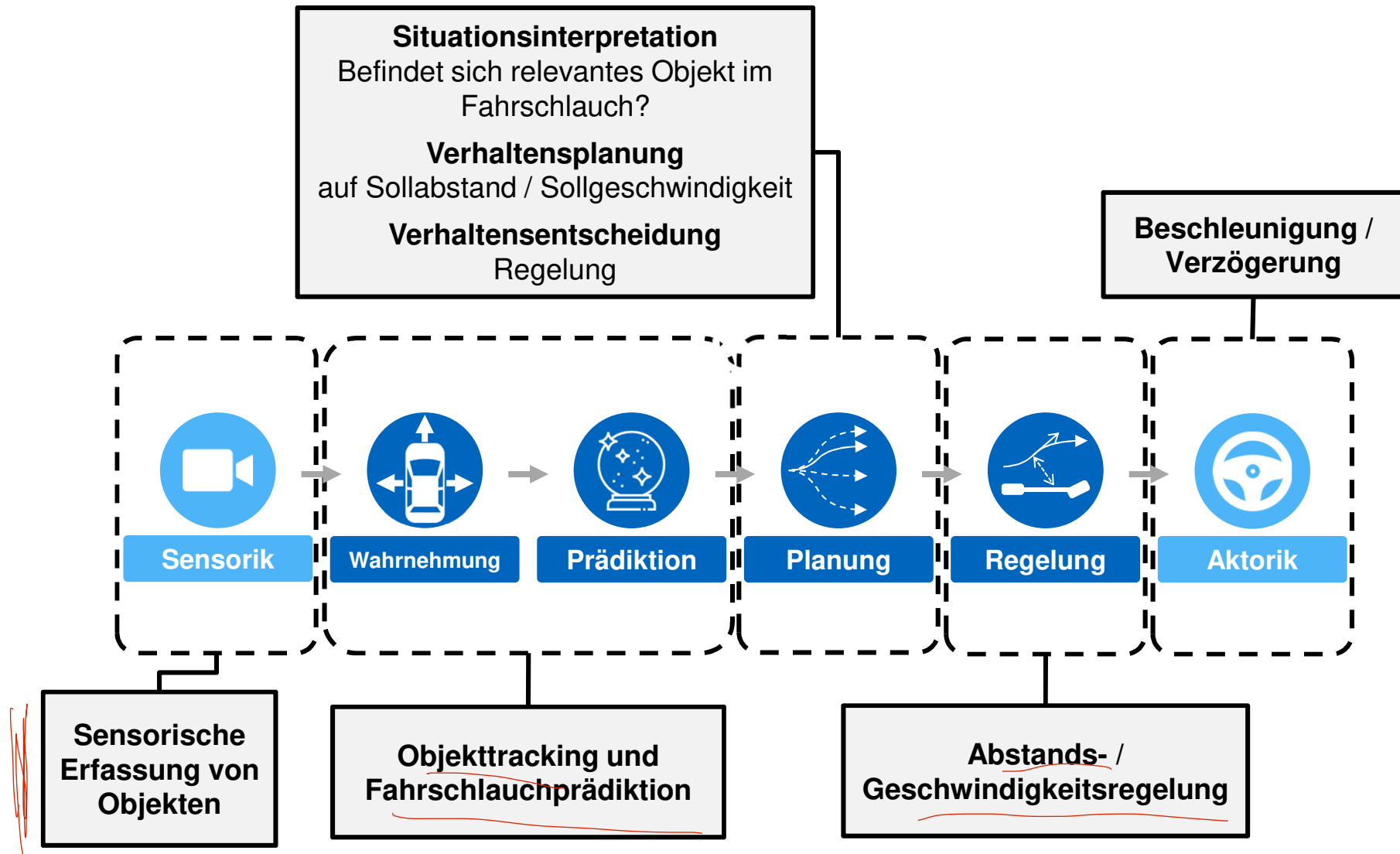
- **Situationsinterpretation**  
Relevantes Fahrzeug in Fahrschlauch
- **Verhaltensplanung**  
Möglichkeit der Regelung von Abstand *oder* Geschwindigkeit
- **Verhaltensentscheidung**  
Regelung auf Abstand → Folgefahrt

情况说明 行车软管中的相关车辆

行为规划 控制距离或速度的可能性

行为决策 控制距离 后续行程

# Einordnung ACC in Systemarchitektur



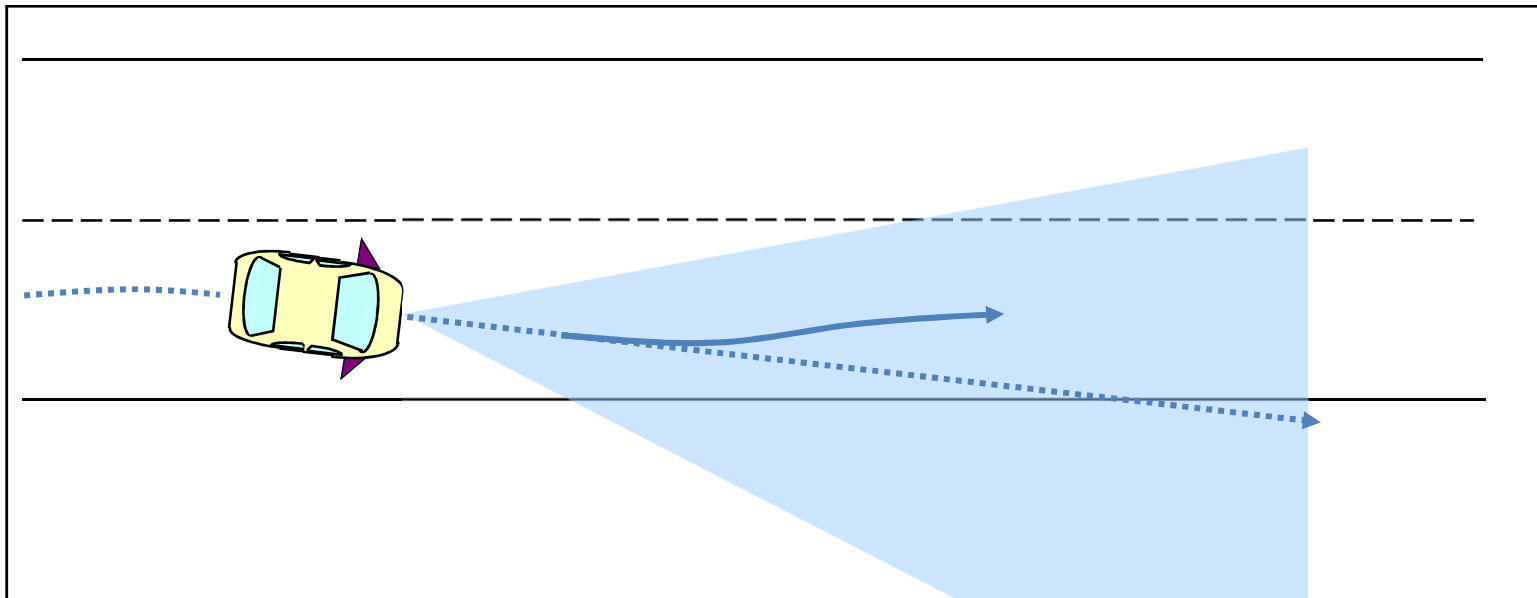
# Lane Keeping Support (LKS)

情况:

车辆离开车道中心, 应返回车道中心

## Situation:

Fahrzeug verlässt Fahrstreifenmitte und soll auf diese zurückkehren



 Kamera nach vorne

Maurer, TUBS

# Funktionslogik für LKS

Mögliche Verhaltensgenerierung für Querführung

- **Situationsinterpretation**

Fahrzeug droht, Fahrbahn zu verlassen

横向制导可能产生的行为

情况解释 车辆有驶离车行道的危险

行为规划 规划可能的返回轨迹

- **Verhaltensplanung**

Planung möglicher Rückführtrajektorien

行为决策 根据成本函数等选择 "最佳" 反馈轨迹

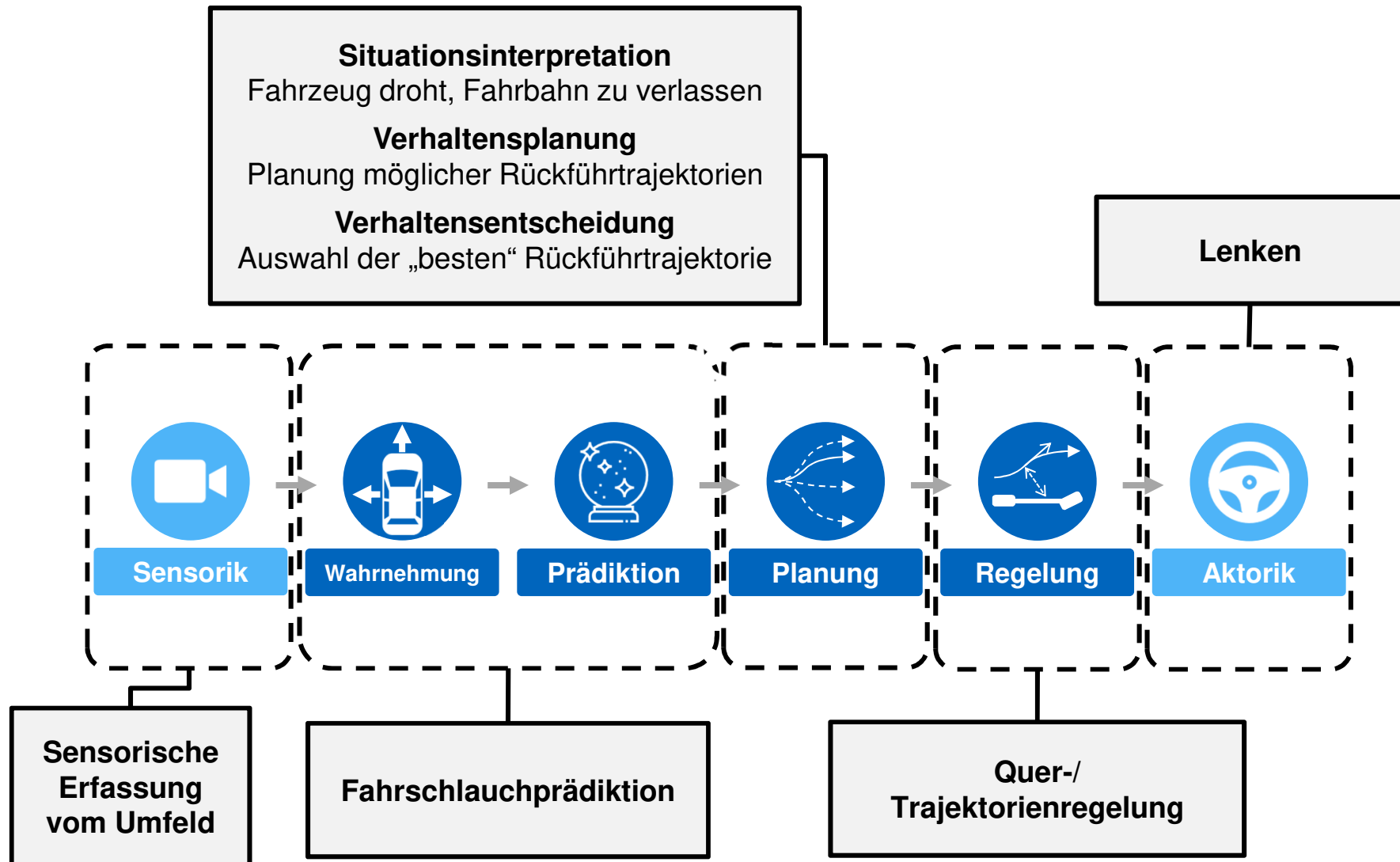
正常车道保持功能不需要

- **Verhaltensentscheidung**

Auswahl der „besten“ Rückführtrajektorie z.B. aufgrund Kostenfunktion

→ Für normale Fahrstreifenhaltefunktion nicht notwendig

# Einordnung LKS in Systemarchitektur



# Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
(Domagoj Majstorovic, M.Sc.)

## Agenda

### 6 Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

#### 6.1 Überblick Funktionale Systemarchitektur

##### 6.1.1 ACC / HC

##### 6.1.2 Beispiele Systemarchitektur

#### 6.2 Planung

##### 6.2.1 Situationserfassung / -interpretation

##### 6.2.2 Verhaltensgenerierung

#### 6.3 Aktorik



# Beispiele Funktionale Architektur (1)

## Braunschweig Stadtpilot

- Ziel: Befahren des Braunschweiger Stadtrings im öffentlichen Verkehr unter Einhaltung der Verkehrsregeln (Fahrstreifenwechsel, Abbiegen, Einfädeln, Einparken)
- Einsatz von Know-How aus der DARPA Urban Challenge
- Fahrzeug: VW Passat „Leonie“ mit Lidar- und Radarsensorik

- 目标：在布伦瑞克城市环路的公共交通中按照交通规则驾驶（变道、转弯、穿线、停车）

- 使用来自 DARPA 城市挑战赛的专门技术

- 车辆：配备激光雷达和雷达传感器的大众帕萨特 "Leonie"

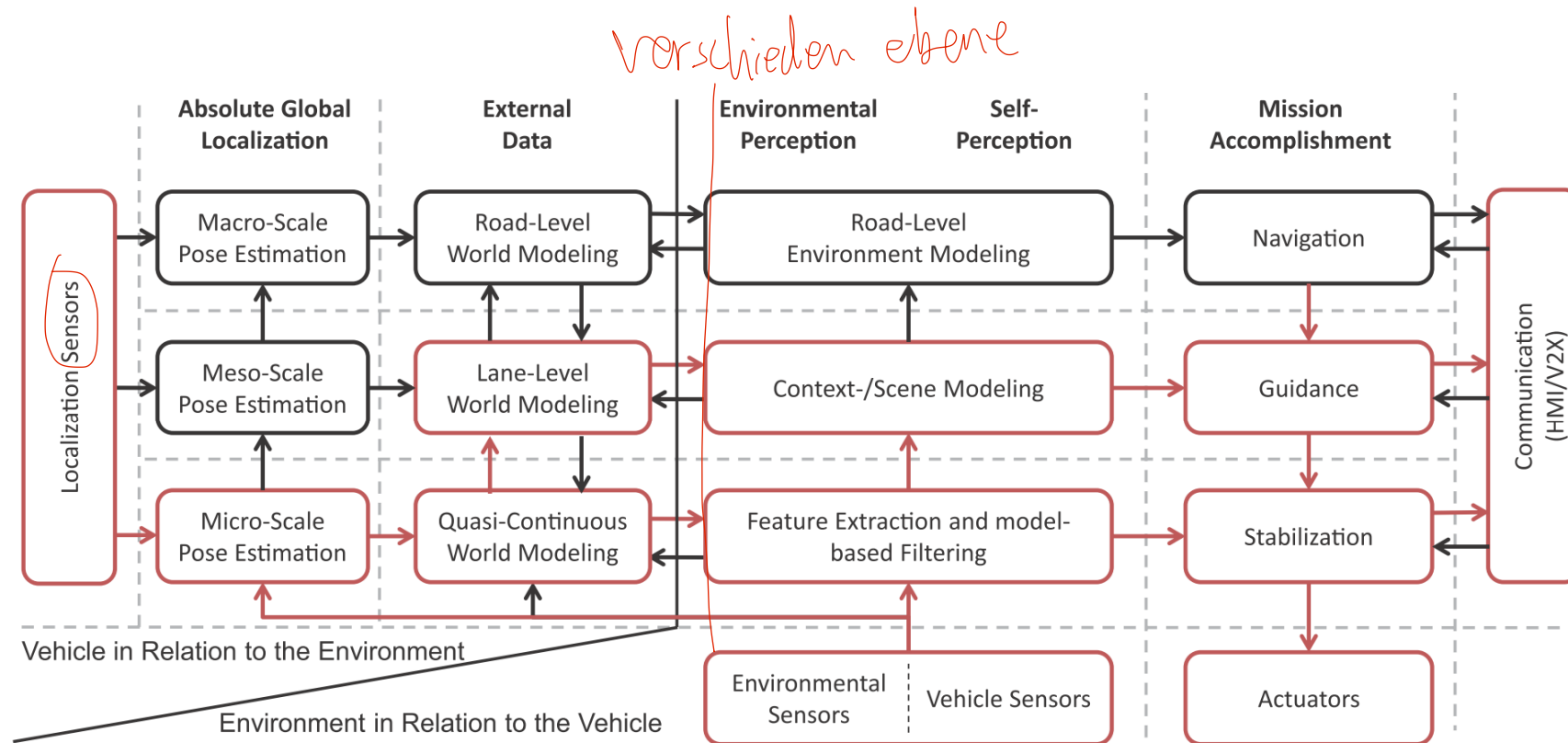


Quelle: [tu-braunschweig.de/stadtpilot](http://tu-braunschweig.de/stadtpilot)



# Beispiele Funktionale Architektur (1)

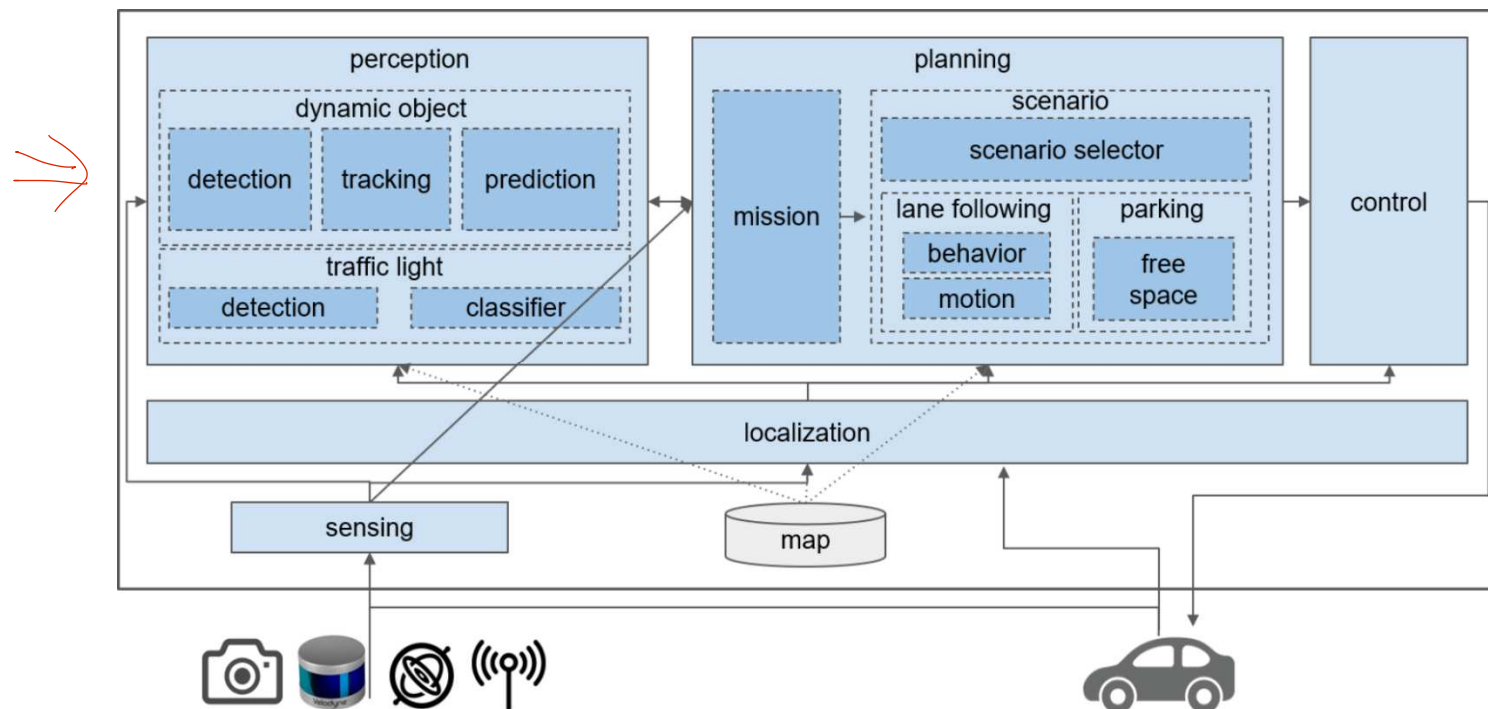
Braunschweig Stadtpilot – Aufteilung basierend auf Fahrzeugführungsebenen



Quelle: Matthaei, Maurer 2015

# Beispiele Funktionale Architektur (2)

## Autoware – Open-Source Software Stack



Quelle: <https://www.autoware.org/autoware>

Autoware: Open-source software for urban autonomous driving, maintained by Tier IV.

# Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
(Domagoj Majstorovic, M.Sc.)

## Agenda

### 6 Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

#### 6.1 Überblick Funktionale Systemarchitektur

##### 6.1.1 ACC / HC

##### 6.1.2 Beispiele Systemarchitektur

#### 6.2 Planung

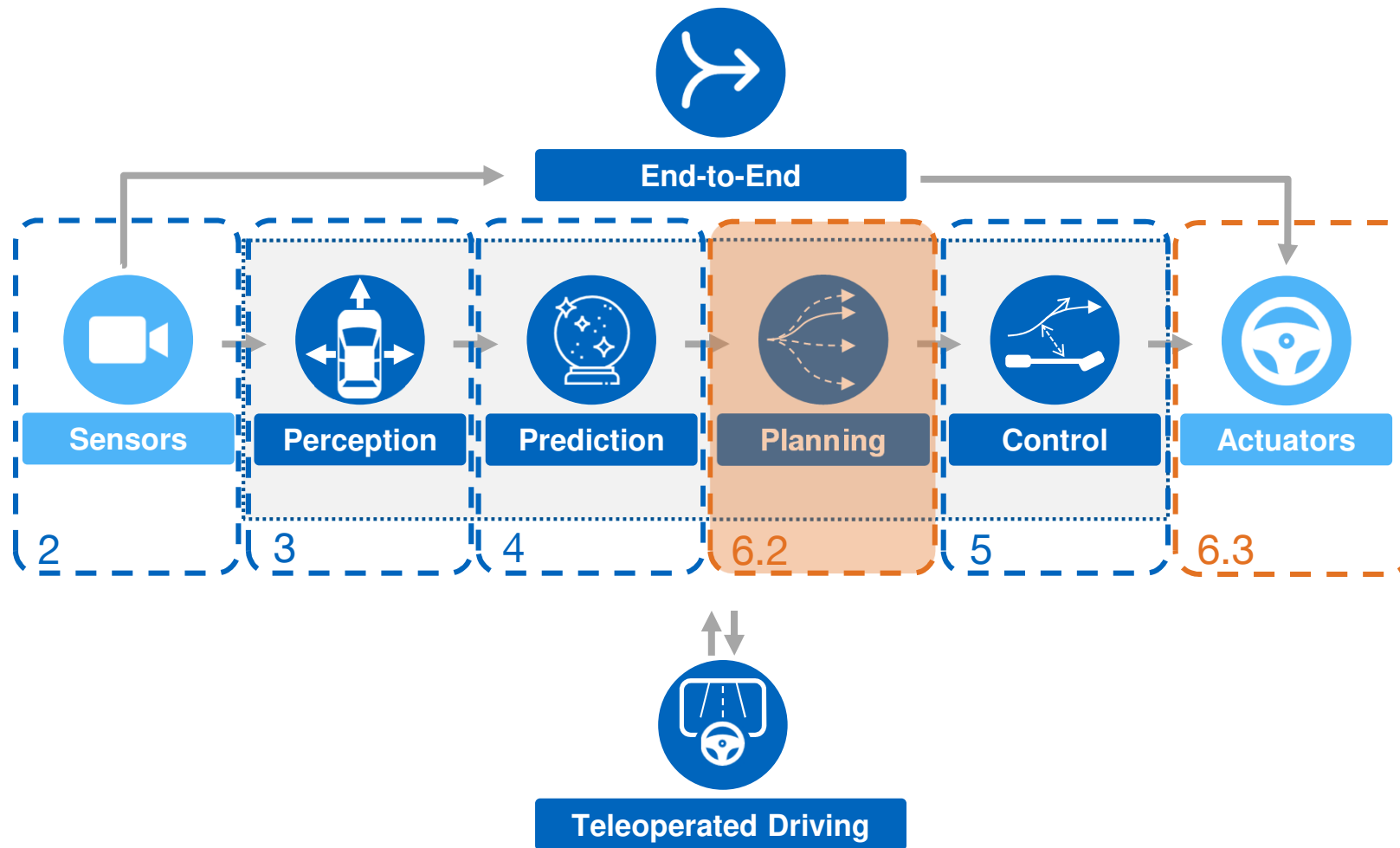
##### 6.2.1 Situationserfassung / -interpretation

##### 6.2.2 Verhaltensgenerierung

#### 6.3 Aktorik



# Funktionale Systemarchitektur | Planung



# Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
(Domagoj Majstorovic, M.Sc.)

## Agenda

### 6 Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

#### 6.1 Überblick Funktionale Systemarchitektur

##### 6.1.1 ACC / HC

##### 6.1.2 Beispiele Systemarchitektur

#### 6.2 Planung

##### 6.2.1 Situationserfassung / -interpretation

##### 6.2.2 Verhaltensgenerierung

#### 6.3 Aktorik



# Aufgaben der Situationserfassung / -interpretation

1. Im Rahmen des Entwicklungsprozesses einer Fahrerassistenzfunktion muss die Situationsanalyse alle möglichen, relevanten Umstände explizit beschreiben.
  - VL-Termin „Entwicklungsprozess“
2. Im laufenden Betrieb müssen diese Umstände mit Hilfe geeigneter Algorithmen (wieder-)erkannt werden.

情况检测/解释任务

1. 作为驾驶辅助功能开发过程的一部分，情况分析必须明确描述所有可能的相关情况。

- VL 课程 "开发过程"

2 在操作过程中，必须借助适当的算法来（重新）识别这些情况。

# Situationserfassung / -interpretation

## Definition und Ziele

*„Die Situationserfassung analysiert die Situation hinsichtlich der Umstände, die für die Ausführung der aktuellen Aufgabe in dem jeweiligen Moment relevant sind.“ (Maurer 2010)*

### **Sensorik / Wahrnehmung**

Rohdaten

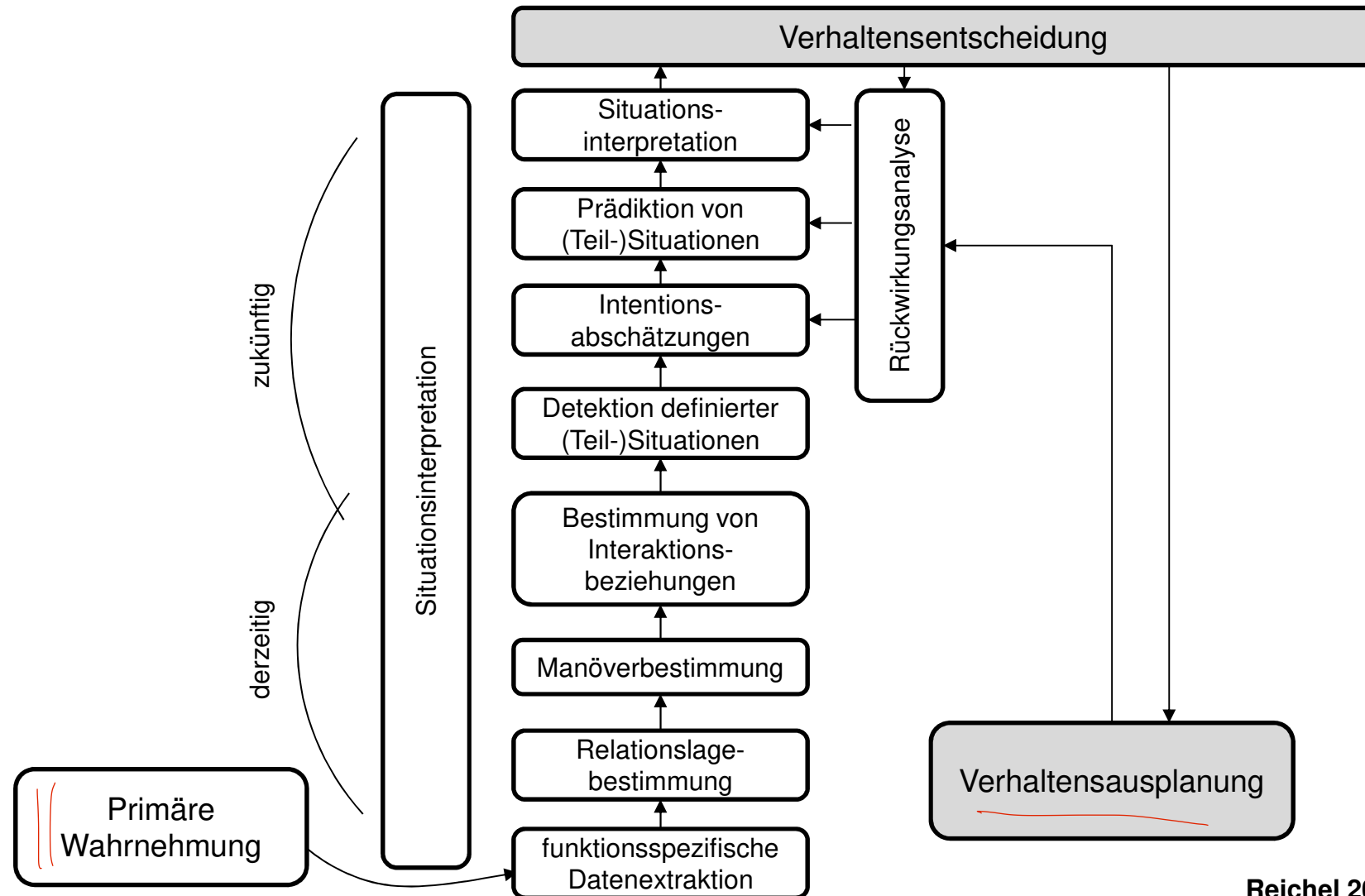
- Objektliste
- Belegungskarte
- Objekttracking
- ...

### **Erkennung und Analyse von:**

- Verkehrsteilnehmern
- Verkehrszustand
- Infrastruktur
- Verkehrszeichen
- Fahrzeugzustand
- Fahrerabsicht
- ...

Reichel 2013

# Systemarchitektur innerhalb der Situationsanalyse



Reichel 2013



## **Kommentarfolie**

### **Manöverbestimmung**

„Bei der Manöverbestimmung wird das derzeitig vom betrachteten dynamischen Objekt vollzogene Manöver bestimmt. Hierbei wird dieses aus Sicht des betrachteten Objektes beschrieben (Fahrzeug 1 fährt an). Sandkühler (2008) klassifiziert beispielsweise das Fahrverhalten im Stau (Stillstand, Anfahren, Folgen, Anhalten...). Bei Hülhnagen u. a. (2010) dienen identifizierte Basiselemente wie Bremsen, Langsam Fahren, Abbiegen mit Blinken, Anhalten etc. der Identifikation komplexerer Situationen (Überholen). Ein Manöver wird in diesem Zusammenhang als atomar bezeichnet, wenn es sich nicht sinnvoll weiter in sich zeitlich aneinanderreihende Manöver aufteilen lässt.“ (Reichel 2013)

### **Bestimmung von Interaktionsbeziehungen**

„Die Bestimmung von Interaktionsbeziehungen zielt auf die explizite Beschreibung der zum aktuellen Zeitpunkt bestehenden Beziehungen zwischen zwei Objekten ab, die den Handlungsspielraum mindestens eines der beiden Objekte einschränken (Fahrzeug 2 verhindert einen Fahrstreifenwechsel nach links von Fahrzeug 1). Hierbei spielen nicht nur Relationslagen und Manöver eine Rolle, sondern auch die in der jeweiligen Domäne gültigen Verkehrsregeln. Ein Beispiel sind Beschränkungen der Ausweichmöglichkeiten bei Autobahnfahrten.“ (Reichel 2013)

## **Kommentarfolie**

### **Detektion definierter (Teil-)Situationen**

„Die Detektion definierter Situationen hat zur Aufgabe, auf die Existenz hochsprachlich bzw. abstrakt überschriebener Situationen zu schlussfolgern, in denen sich ein Bezugsobjekt zum Betrachtungszeitpunkt befindet. Da sich das Bezugsobjekt gleichzeitig in mehreren Situationen wiederfinden kann, steht dieser Punkt auch für die Detektion von Teilsituationen (Einfädelsituation + Rettungsgassenbildung). Branz (2010) spricht diesbezüglich von der Klassifikation von Situationen aus einem Situationskatalog (und einer anschließenden, situationsabhängigen Prädiktion). Ein Beispiel ist ein System zur Identifikation von Einfädelsituationen (Befindet sich das EGO in einer Einfädelsituation auf dem aufnehmenden Fahrstreifen?). Ein weiteres Beispiel findet sich bei Isermann u. a. (2010): Das Fahrzeug muss bestimmen, ob es sich in einer Überholsituation befindet, um ggf. eine entsprechende Überhol-Assistenzfunktion anzubieten.“ (Reichel 2013)

### **Intentionsabschätzungen**

„Die meisten am Straßenverkehr beteiligten dynamischen Objekte können ihren Zustand von sich aus beeinflussen. Nach dem Modell des menschlichen Entscheidungsprozesses existieren auf- und abschwellige Motivationstendenzen, die durch eine Intentionsbildung für das Objekt handlungsbestimmend werden. Die Intentionsabschätzungen haben zur Aufgabe, a priori definierte Motivationstendenzen explizit zu beziffern (Fahrzeug 1 will links abbiegen: Wahrscheinlichkeit x) und diejenigen zu ermitteln, die das Verhalten des Objektes bestimmen werden.“ (Reichel 2013)

## **Kommentarfolie**

### **Prädiktion von (Teil-)Situationen**

„Die Prädiktion von (Teil-)Situationen hat die Aufgabe, unter Beachtung der im Vorfeld ermittelten Informationen den Zustand des Systems zu bestimmten Zeitpunkten in der Zukunft zu ermitteln (Wie sieht die dynamische Szene in 2 Sekunden aus?)“ (Reichel 2013)

### **Situationsinterpretation**

„Die Situationsinterpretation beschäftigt sich mit der Bedeutungsfindung der vorliegenden Informationen über die Situation aus Sicht der angestrebten Automatisierung (Ist diese Situation für das EGO gefährlich?). Hierfür werden bestimmte Kennziffern ermittelt, um die Bedeutung im Rechner abbilden zu können. So benutzten viele Systeme zur Unfallvermeidung Zeit- und/oder Raummaße, um die Kritikalität zu bestimmen. An dieser Stelle fließen auch die Einzelinformationen zur eigenen Leistungsfähigkeit zusammen, die über alle Module gesammelt werden. Ist die angestrebte Funktion derzeit überhaupt nicht in der Lage, ihre Ziele fehlerfrei umzusetzen, so wird dies an dieser Stelle explizit bekannt. Die Verhaltensentscheidung hat somit die Möglichkeit, ggf. Gegenmaßnahmen einzuleiten bzw. eine Funktion gar nicht erst freizuschalten.“ (Reichel 2013)

### **Rückwirkungsanalyse**

„Bei der Rückwirkungsanalyse handelt es sich um einen rekursiven Pfad, bei der auf der Grundlage (hypothetisch) getroffener Verhaltensentscheidungen und -ausplanungen die Rückwirkungen der eigenen (potentiellen) Handlungen noch einmal in Frage gestellt werden (Wie wirkt sich mein angestrebtes Verhalten auf den Gesamtsystemzustand in X Sekunden aus?). Die von Altho (2010) vorgestellte, online erfolgende Sicherheitsbewertung einer automatischen Fahrfunktion durch Überprüfung der ermittelten Trajektorie ist eine solche Rückwirkungsanalyse.“ (Reichel 2013)

# Systemarchitektur innerhalb der Situationsanalyse

## → Beispiel Stauassistent

*All mögliche Situationen*

- Relevante Situationsaspekte, die berücksichtigt werden müssen:
  - Art der Stausituation (stehend oder bewegt)
  - Fahrstreifen-Objektzuordnung
  - Einscherersituation vor Ego-Fahrzeug
  - Einfädelsituation
  - Fahrstreifenende
  - Kolonne vor Ego-Fahrzeug
  - Kolonne oder Randbebauung links oder rechts
  - ...

情况分析中的系统结构 → 交通堵塞助手示例

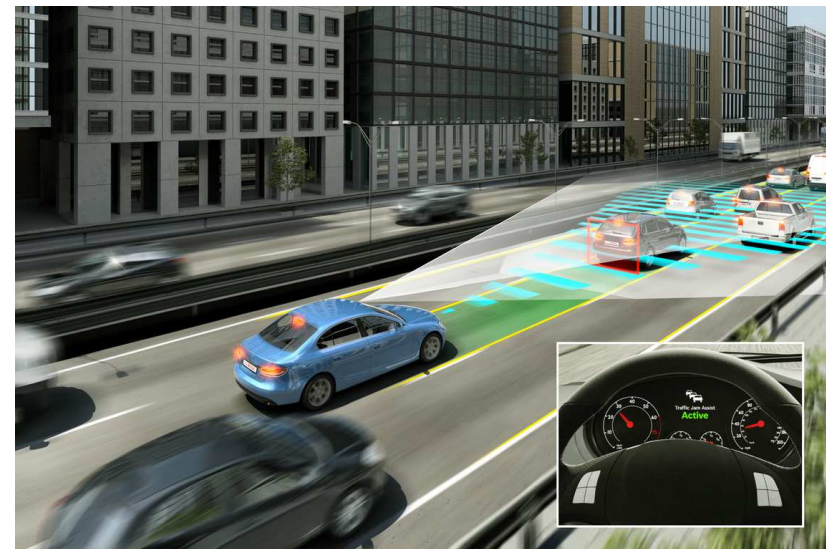
- 必须考虑的相关情况:

- 拥堵情况类型 (静止或移动) 车道对象分配

- 自我车辆前方的倒车情况 车道末端的穿线情况

- 自我车辆前方的立柱

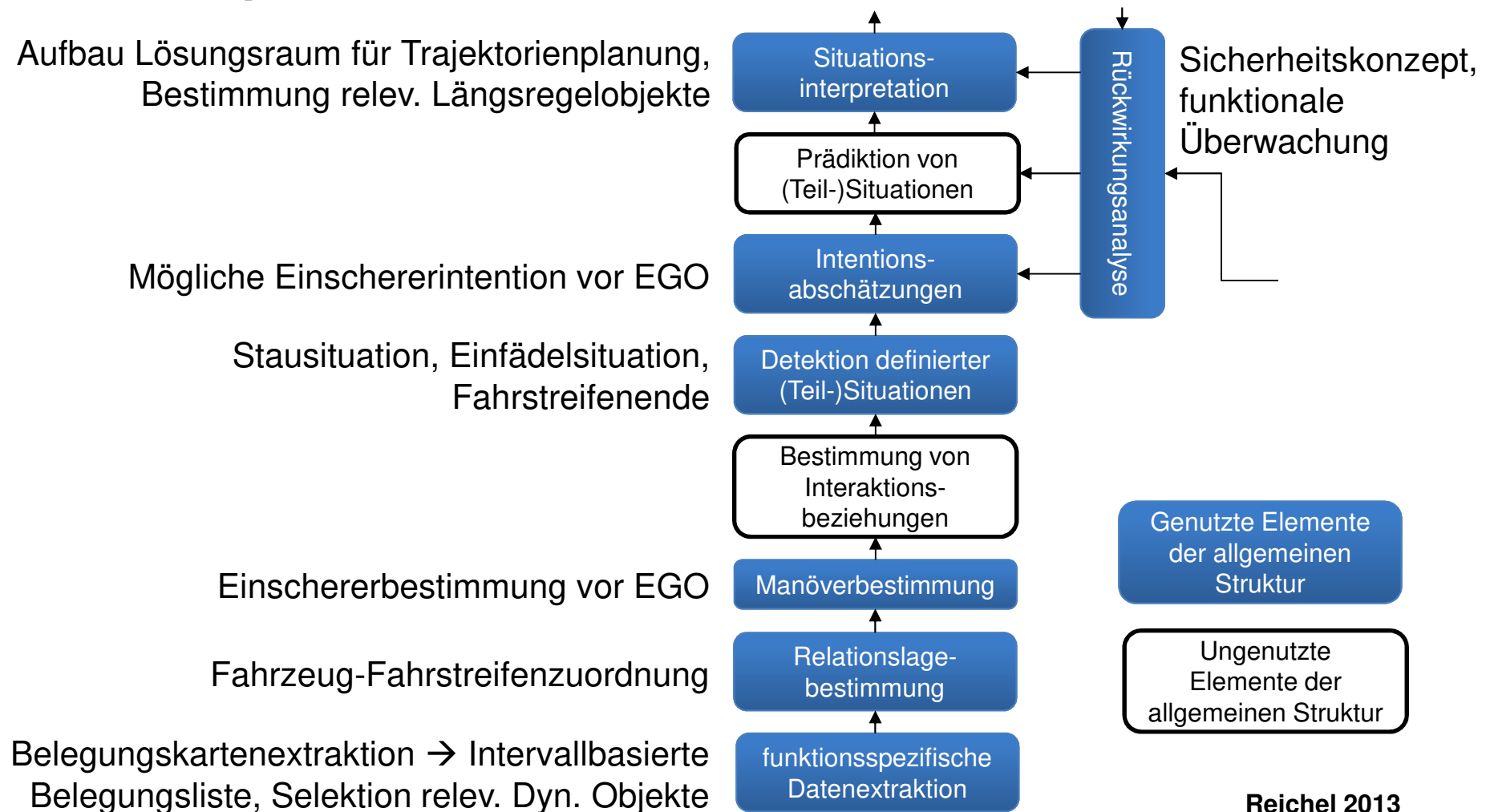
- 左侧或右侧立柱或路缘



Bildquelle: Auto.de

# Systemarchitektur innerhalb der Situationsanalyse

## → Beispiel Stauassistent



Reichel 2013

# Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
(Domagoj Majstorovic, M.Sc.)

## Agenda

### 6 Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

#### 6.1 Überblick Funktionale Systemarchitektur

##### 6.1.1 ACC / HC

##### 6.1.2 Beispiele Systemarchitektur

#### 6.2 Planung

##### 6.2.1 Situationserfassung / -interpretation

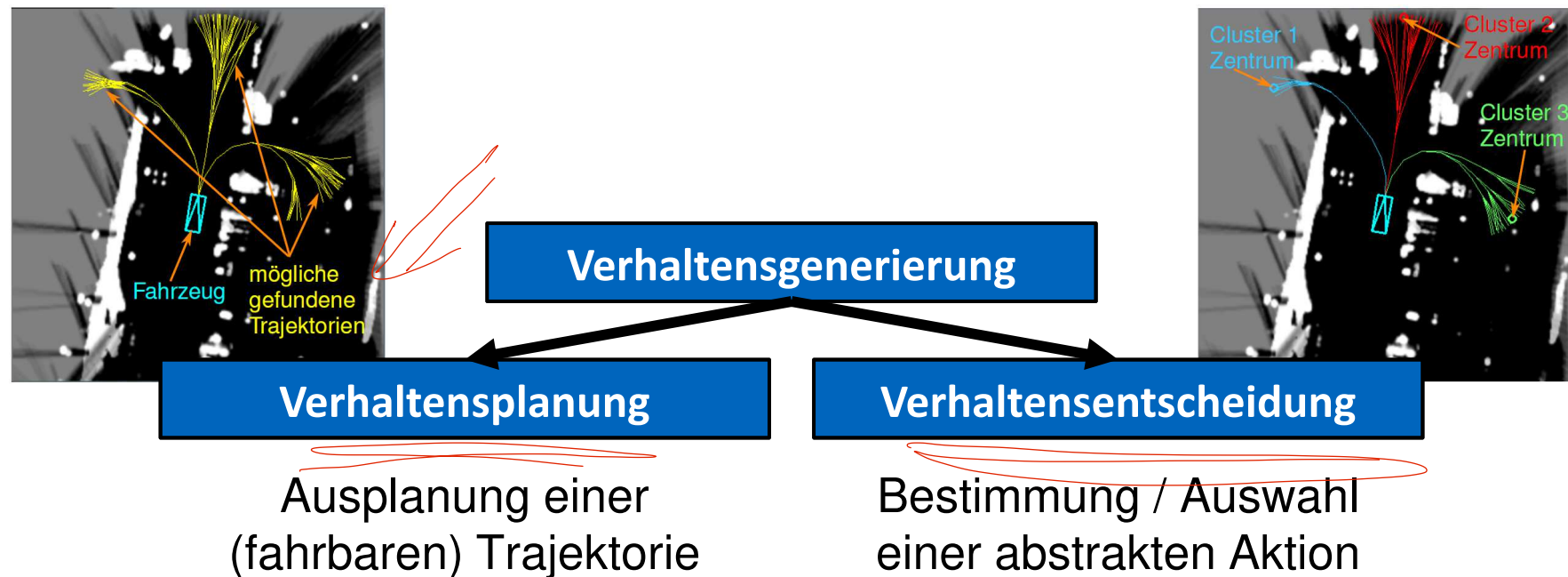
##### 6.2.2 Verhaltensgenerierung

- Verhaltensplanung
- Verhaltensentscheidung

#### 6.3 Aktorik



# Verhaltensgenerierung



Reihenfolge der beiden Teilaufgaben nicht festgelegt:

- Planung von mehreren Trajektorien und anschließende Auswahl
- Bestimmung einer abstrakten Aktion (z.B. Spurwechsel links) und nachgelagerte gezielte Ausplanung einer Trajektorie

未指定两个子任务的顺序:

6 Funktionale Systemarchitektur und Aktorik → 6.2 Planung → 6.2.2 Verhaltensgenerierung → Verhaltensentscheidung

- 规划多个轨迹并随后进行选择

- 确定一个抽象动作（如向左变道），然后有针对性地规划轨迹

# Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
(Domagoj Majstorovic, M.Sc.)

## Agenda

---

### 6 Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

#### 6.1 Überblick Funktionale Systemarchitektur

##### 6.1.1 ACC / HC

##### 6.1.2 Beispiele Systemarchitektur

#### 6.2 Planung

##### 6.2.1 Situationserfassung / -interpretation

##### 6.2.2 Verhaltensgenerierung

- Verhaltensplanung
- Verhaltensentscheidung

#### 6.3 Aktorik

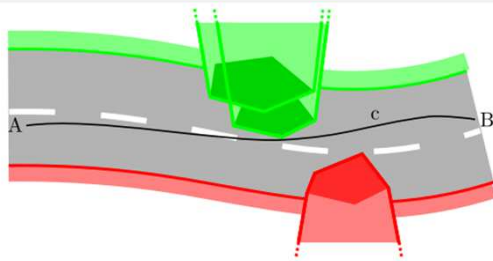




# Verhaltensplanung

Existierende Ansätze

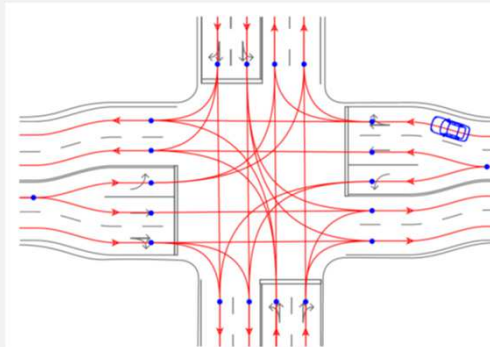
## Numerische Optimierung



$$\min J(x(t))$$

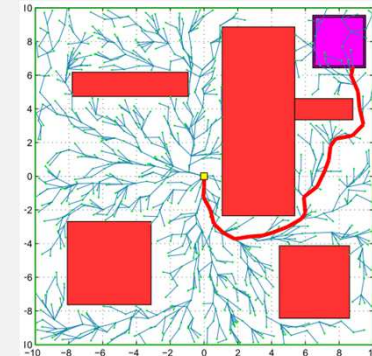
$$J(x(t)) = \int_{t_0}^{t_0+T} L(x, \dot{x}, \ddot{x}, \ddot{x}) dt$$

## Graphensuche



$$G=(V, E)$$

## Sampling basiert



```

V ← {xinit}; E ← ∅; i ← 0;
while i < N do
  G ← (V, E);
  xrand ← Sample(i); i ← i + 1;
  (V, E) ← Extend(G, xrand);

```

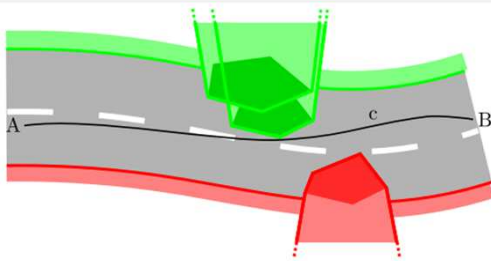
## Hybrid Methoden

Übersicht: [arxiv.org/pdf/1604.07446.pdf](https://arxiv.org/pdf/1604.07446.pdf)

# Verhaltensplanung

Existierende Ansätze

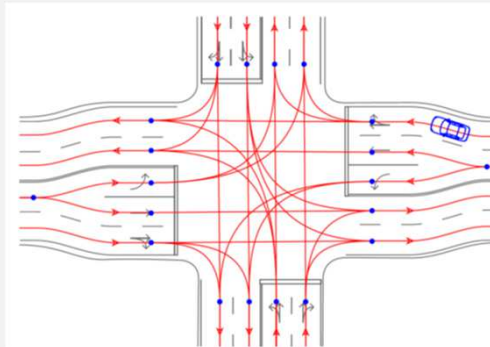
## Numerische Optimierung



$$\min J(x(t))$$

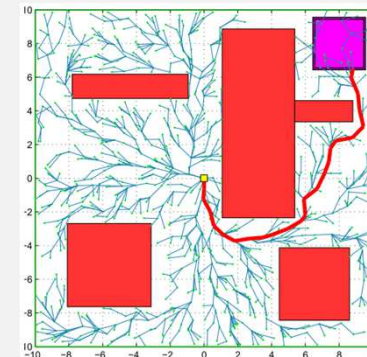
$$J(x(t)) = \int_{t_0}^{t_0+T} L(x, \dot{x}, \ddot{x}, \ddot{x}) dt$$

## Graphensuche



$$G=(V, E)$$

## Sampling basiert



```

V ← {xinit}; E ← ∅; i ← 0;
while i < N do
  G ← (V, E);
  xrand ← Sample(i); i ← i + 1;
  (V, E) ← Extend(G, xrand);

```

## Hybrid Methoden

Übersicht: [arxiv.org/pdf/1604.07446.pdf](https://arxiv.org/pdf/1604.07446.pdf)

# Verhaltensplanung

Numerische Optimierung

## Kostenfunktion

$$\text{minimize } J(\mathbf{x}(t)) = \int_{t_0}^{t_0+T} L(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}, \dddot{\mathbf{x}}) dt$$

## Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} \text{subject to } & \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad \text{and} \quad \mathbf{x}(t_0 + T) \in X_{\text{goal}} \\ & f(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \dots) = 0 \quad \forall t \in [t_0, t_0 + T] \\ & g(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \dots) \leq 0 \quad \forall t \in [t_0, t_0 + T] \end{aligned}$$

Internal { Kinematic  
Dynamic  
 External { Driving corridor  
Obstacles

Beispiel:

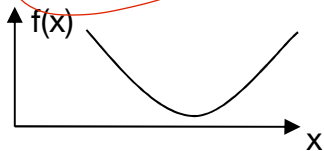
$$L = \underbrace{w_{\text{off}} |\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{ref}}|^2}_{\text{Querabweichung}} + \underbrace{w_{\text{vel}} |\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_{\text{ref}}|^2}_{\text{Längsabweichung}} + \underbrace{w_{\text{acc}} |\ddot{\mathbf{x}}|^2}_{\text{Beschleunigung}} + \underbrace{w_{\text{jerk}} |\dddot{\mathbf{x}}|^2}_{\text{Ruck}}$$

# Verhaltensplanung

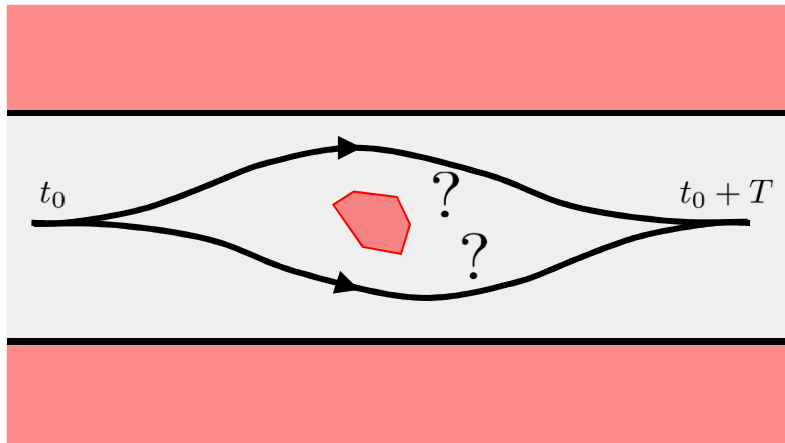
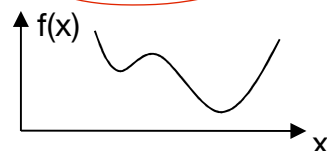
Numerische Optimierung - Grenzen

## Globale Lösungen

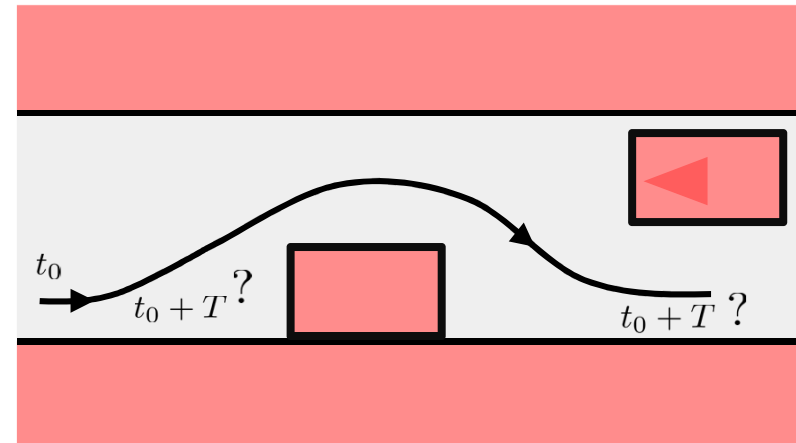
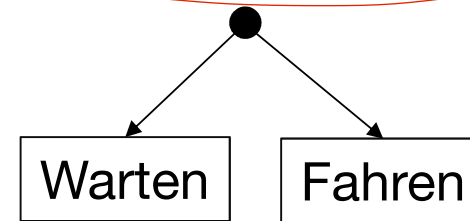
Convex:



Non-convex:



## Kombinatorische Aspekte



## Kommentarfolie

Die Grundlage der Variationsmethoden ist ein Kostenfunktional. Dieses ist in der Regel ein Integral über die Kostenfunktion vom aktuellen Zeitpunkt bis zum Planungszeithorizont. Die Kostenfunktion enthält Terme, die in der Regel gegeneinander arbeiten. So wirken z.B. Terme, die eine Abweichung vom Referenzpfad oder der Zielgeschwindigkeit bestrafen, gegen Terme, die eine Glättung der Trajektorie bewirken sollen und hohe Beschleunigungen oder Ruck bestrafen.

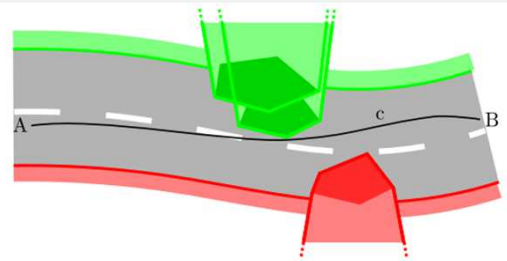
Solche Optimierungsprobleme werden mit nichtlinearen Optimierungsverfahren gelöst. Bei einer anfänglichen Schätzung der Lösung können aktuelle Löser ein lokales Minimum mit nur wenigen Iterationen finden. Das Planungsproblem ist jedoch im Allgemeinen ein nicht-konvexes Problem, bei dem das lokale Optimum nicht unbedingt das globale Optimum ist. Das einfache Beispiel, ob ein Ausweichmanöver nach links oder nach rechts durchgeführt werden soll, ist ein Problem, bei dem die machbare Region und damit die Randbedingungen nicht konvex sind. Es gibt Löser, die das globale Optimum finden können, die jedoch exponentiell zur Anzahl der Variablen und Nebenbedingungen Zeit benötigen.

Um den Vorteil der schnellen Berechnung beizubehalten, erfordern lokale Methoden eine vorherige Entscheidung, um die richtige lokale Lösung des Problems zu finden. Diese Entscheidung kann von Verkehrsregeln abgeleitet werden, z.B. "nur links überholen", "Vorfahrt gewähren" oder von einem übergeordneten Verhaltensplaner, der kombinatorische Aspekte eines Szenarios berücksichtigt.

# Verhaltensplanung

Existierende Ansätze

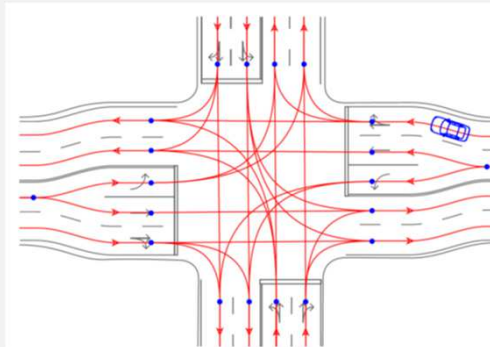
## Numerische Optimierung



$$\min J(\mathbf{x}(t))$$

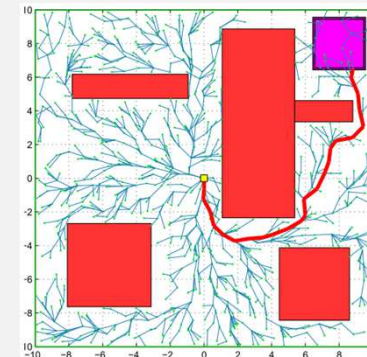
$$J(\mathbf{x}(t)) = \int_{t_0}^{t_0+T} L(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}) dt$$

## Graphensuche



$$G=(V, E)$$

## Sampling basiert



```

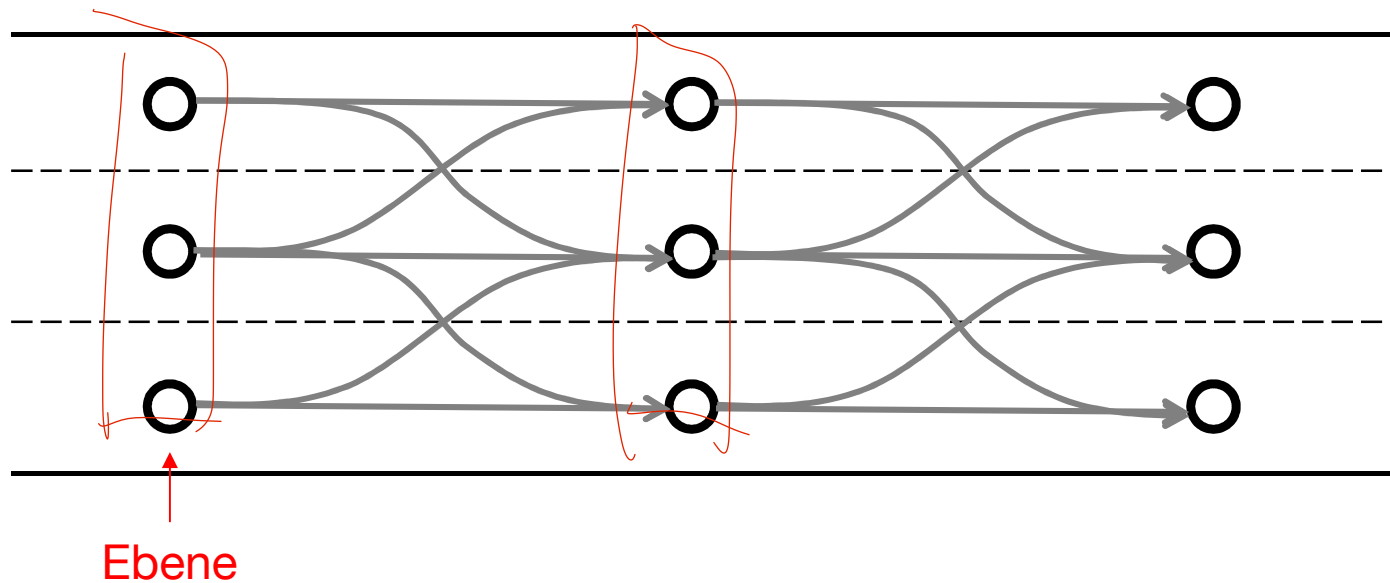
V ← {xinit}; E ← ∅; i ← 0;
while i < N do
  G ← (V, E);
  xrand ← Sample(i); i ← i + 1;
  (V, E) ← Extend(G, xrand);
  
```

## Hybrid Methoden

Übersicht: [arxiv.org/pdf/1604.07446.pdf](https://arxiv.org/pdf/1604.07446.pdf)

# Verhaltensplanung

## Graphensuche



Knoten

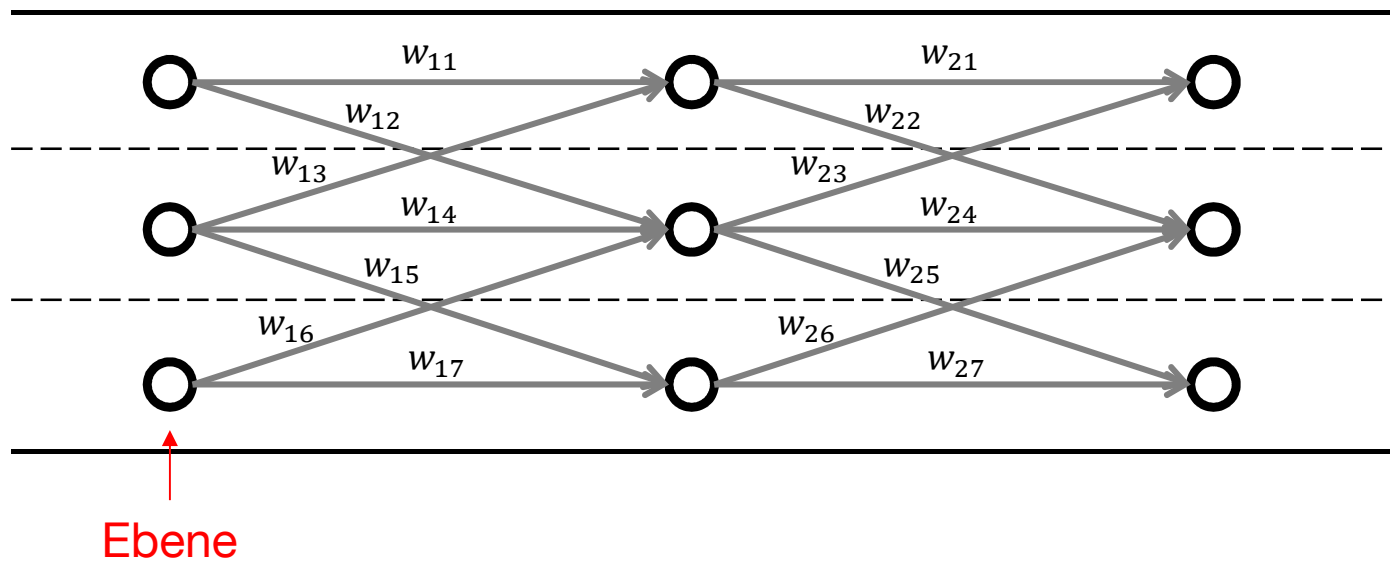


(gewichtete)  
gerichtete Kante

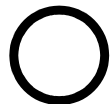
**Kanten Gewichte** können als  
Kosten verstanden werden  
(z.B. Zeit, Distanz ...)

# Verhaltensplanung

## Graphensuche



Knoten



(gewichtete)  
gerichtete Kante

**Kanten Gewichte** können als  
Kosten verstanden werden  
(z.B. Zeit, Distanz ...)



## Kommentarfolie

Ein Graph besteht aus Knoten und Kanten, die die Knoten verbinden. Wenn die Kanten gewichtet sind, kann man den kostenoptimalen Weg in einem Graphen finden (siehe ADSE Vorlesung 6 für Details).

Aber wie kann man Graphen für die Pfadplanung verwenden?

Bei graphenbasierten Methoden wird der Konfigurationsraum oder Zustandsraum diskretisiert. Man platziert Knoten an bestimmten Positionen auf der Straße. Im Autobahnbeispiel gibt es drei Ebenen mit jeweils drei Knoten. Die gerichteten Kanten, die die Knoten verbinden, stellen mögliche Pfade zwischen den Schichten dar. Nachdem man jeder Kante Kosten  $w_{ij}$  zugewiesen hat, kann man den kostenoptimalen Weg finden. Die Kanten müssen an den Übergängen kontinuierlich sein.

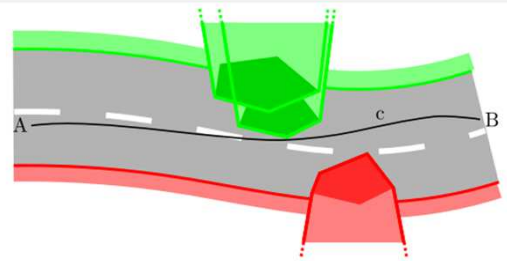
Für die Trajektorienplanung ist es notwendig, die Knoten mit zeitlichen Informationen wie Zeit und Geschwindigkeit zu erweitern (dies ist im Autobahnbeispiel nicht visualisiert). Dadurch müssen wir für jeden „Orts Knoten“ im Beispiel mehrere Knoten berücksichtigen

Die graphbasierten Verfahren sind nicht auf lokale Minima beschränkt. Aufgrund der festen Diskretisierung ist es jedoch nur möglich, eine suboptimale Lösung zu finden.

# Verhaltensplanung

Existierende Ansätze

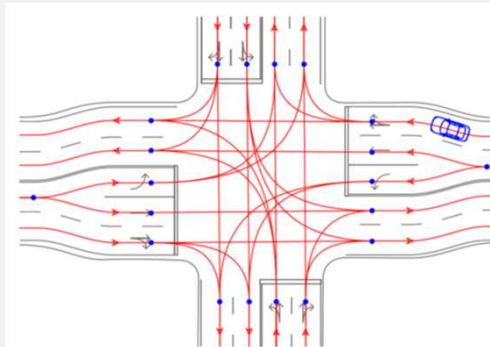
## Numerische Optimierung



$$\min J(x(t))$$

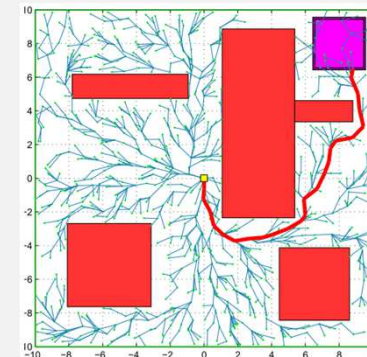
$$J(x(t)) = \int_{t_0}^{t_0+T} L(x, \dot{x}, \ddot{x}, \ddot{x}) dt$$

## Graphensuche



$$G=(V, E)$$

## Sampling basiert



```

V ← {xinit}; E ← ∅; i ← 0;
while i < N do
  G ← (V, E);
  xrand ← Sample(i); i ← i + 1;
  (V, E) ← Extend(G, xrand);

```

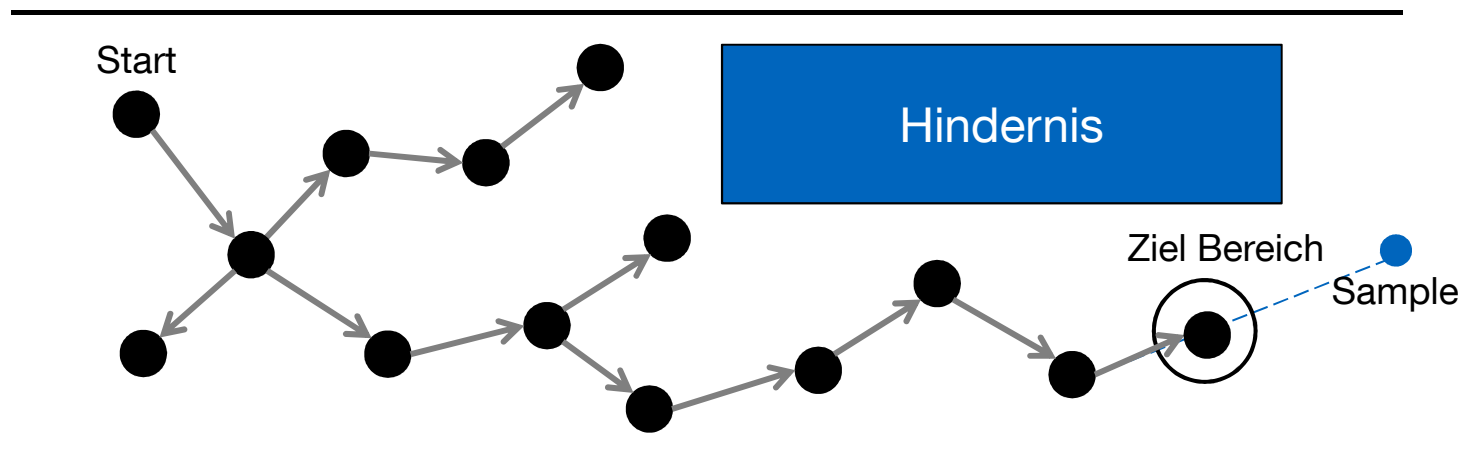
## Hybrid Methoden

Übersicht: [arxiv.org/pdf/1604.07446.pdf](https://arxiv.org/pdf/1604.07446.pdf)

# Verhaltensplanung

## Sampling-basierte Pfad Planung

- Algorithmus zur Pfad Planung nach La Valle (1998)



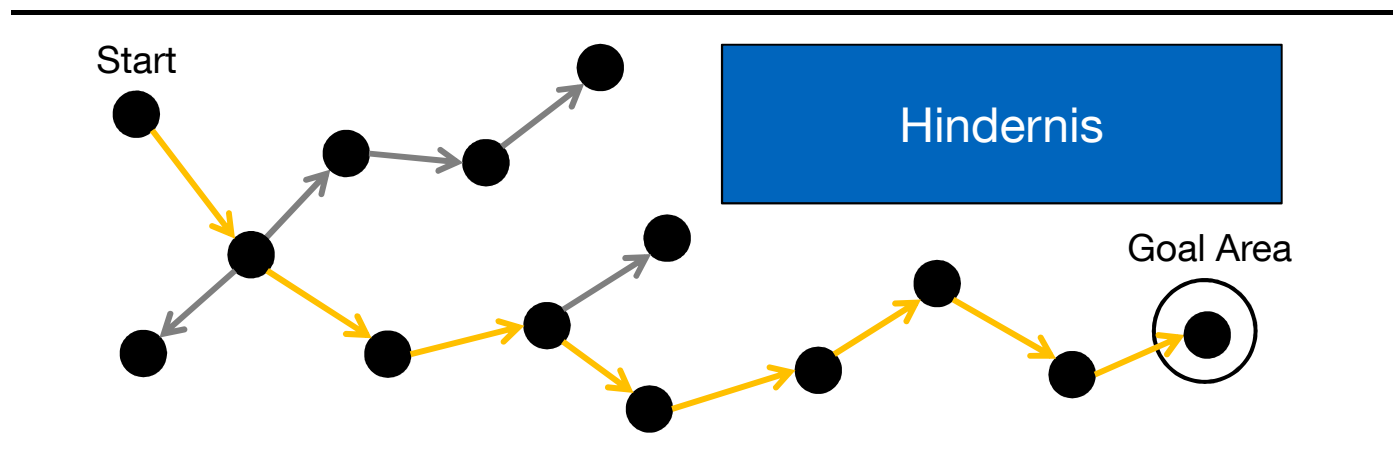
Folgende Schritte werden solange wiederholt, bis das Ziel erreicht ist:

1. Zufälliger Punkt im Lösungsraum wird generiert (Sample-Punkt).
2. Der nächste Knoten zum Sample-Punkt wird ermittelt.
3. Baum wird vom nächsten Knoten in Richtung des Sample-Punktes verlängert (falls kollisionsfrei)

# Verhaltensplanung

# Sampling-basierte Pfad Planung

- Algorithmus zur Pfad Planung nach La Valle (1998)



Folgende Schritte werden solange wiederholt, bis das Ziel erreicht ist:

1. Zufälliger Punkt im Lösungsraum wird generiert (Sample-Punkt).
2. Der nächste Knoten zum Sample-Punkt wird ermittelt.
3. Baum wird vom nächsten Knoten in Richtung des Sample-Punktes verlängert (falls kollisionsfrei)

## Kommentarfolie

Inkrementelle Methoden erkunden den Zustandsraum inkrementell. Im Gegensatz zu graphenbasierten Methoden suchen diese Methoden nicht innerhalb einer festen Diskretisierung. Daher finden die inkrementellen Methoden eine Lösung (falls eine existiert) mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd eins, wenn genügend Rechenzeit zur Verfügung steht. Diese Eigenschaft wird als probabilistische Vollständigkeit bezeichnet.

Typischerweise wird die Diskretisierung dieser Methoden inkrementell immer feiner. Aus diesem Grund wird in einfachen Szenarien die Lösung schnell gefunden.

Eine der einfachsten inkrementellen Methoden ist der 1998 von La Valle [1] vorgeschlagene RRT-Algorithmus für die Pfadplanung. In jedem Schritt wird ein zufälliger Punkt im Konfigurationsraum erzeugt. Anschließend wird der nächstgelegene Knoten des aktuellen Baums zu diesem Punkt bestimmt. Vom nächstgelegenen Knoten wird der Baum um eine bestimmte Länge in Richtung des abgetasteten Punktes erweitert. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis ein direkter Weg zwischen Startknoten und Zielgebiet existiert.

RRT wird immer eine Lösung finden, wenn genügend Rechenzeit vorhanden ist. Diese Lösung ist jedoch nicht optimal (man sieht, dass der resultierende Pfad zackig ist). Um dieses Problem zu lösen, schlugen Karaman und Frazzoli [2] im Jahr 2010 den RRT\*-Algorithmus vor.

Neben RRT\* gibt es noch weitere Varianten des grundlegenden RRT-Algorithmus, die jedoch den Rahmen dieser Vorlesung sprengen würden.

# Verhaltensplanung

Vergleich

	+	-
<b>Numerische Optimierung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Diskretisierung</li> <li>Geringe Rechenzeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Findet lokale Optima</li> <li>Solver von Kosten abhängig</li> </ul>
<b>Graphensuche</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Findet globales Optimum</li> <li>Flexible Kostenfunktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diskrete Lösung</li> <li>Fluch der Dimensionen</li> </ul>
<b>Sampling basiert</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stochastisch vollständig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lösung in endlicher Zeit nicht garantiert</li> </ul>

# Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
(Domagoj Majstorovic, M.Sc.)

## Agenda

### 6 Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

#### 6.1 Überblick Funktionale Systemarchitektur

##### 6.1.1 ACC / HC

##### 6.1.2 Beispiele Systemarchitektur

#### 6.2 Planung

##### 6.2.1 Situationserfassung / -interpretation

##### 6.2.2 Verhaltensgenerierung

- Verhaltensplanung
- Verhaltensentscheidung

#### 6.3 Aktorik



# Verhaltensentscheidung

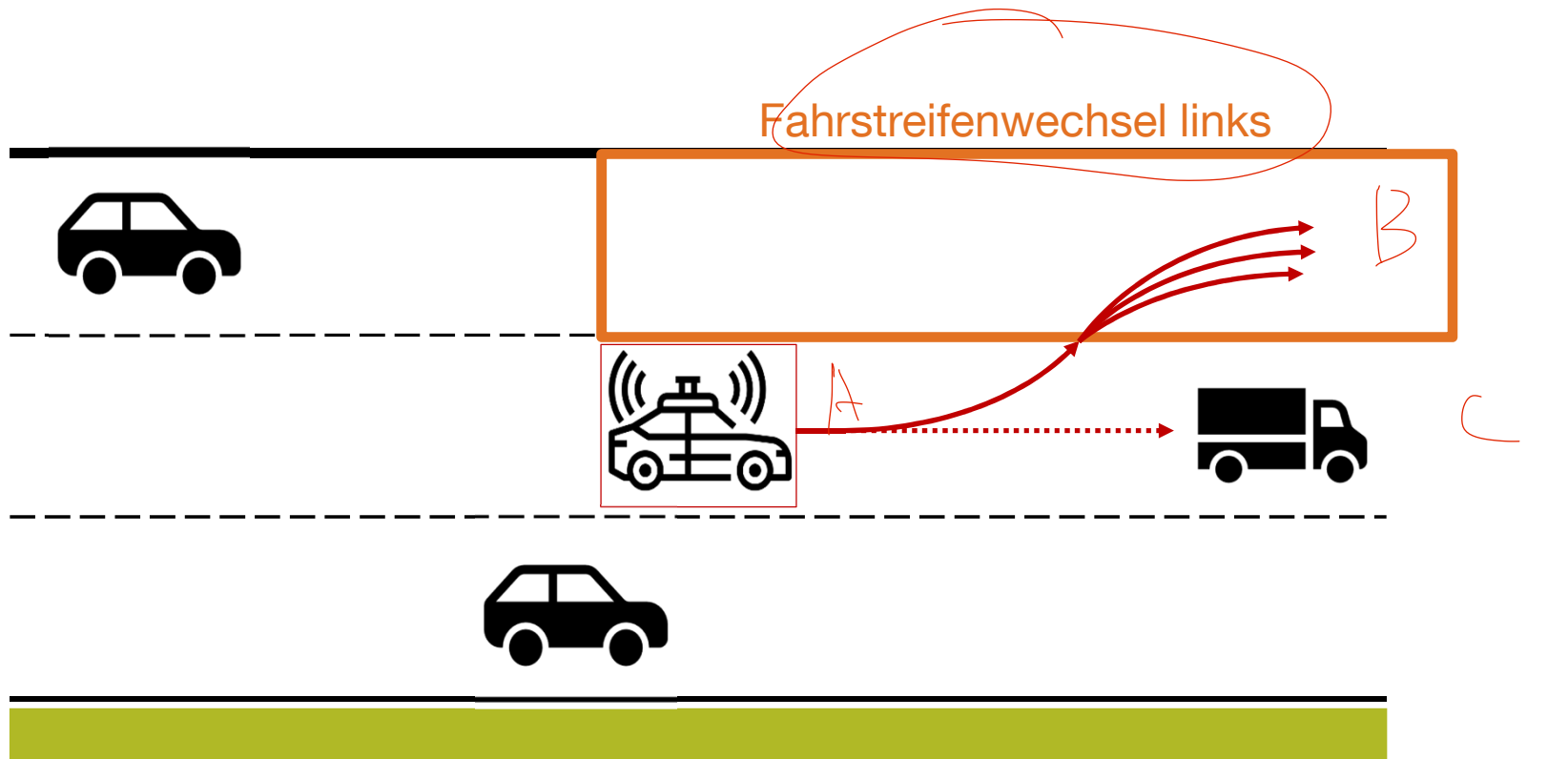
## Existierende Ansätze

- Zustandsautomaten
- Spieltheorie
- Predictive Risk Map
- ...



# Zustandsautomat

## Beispiel

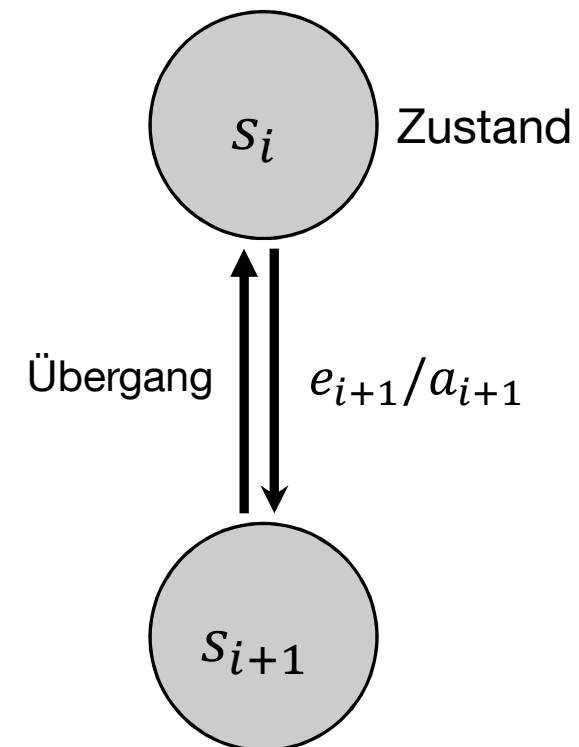


# Zustandsautomat

## Beispiel

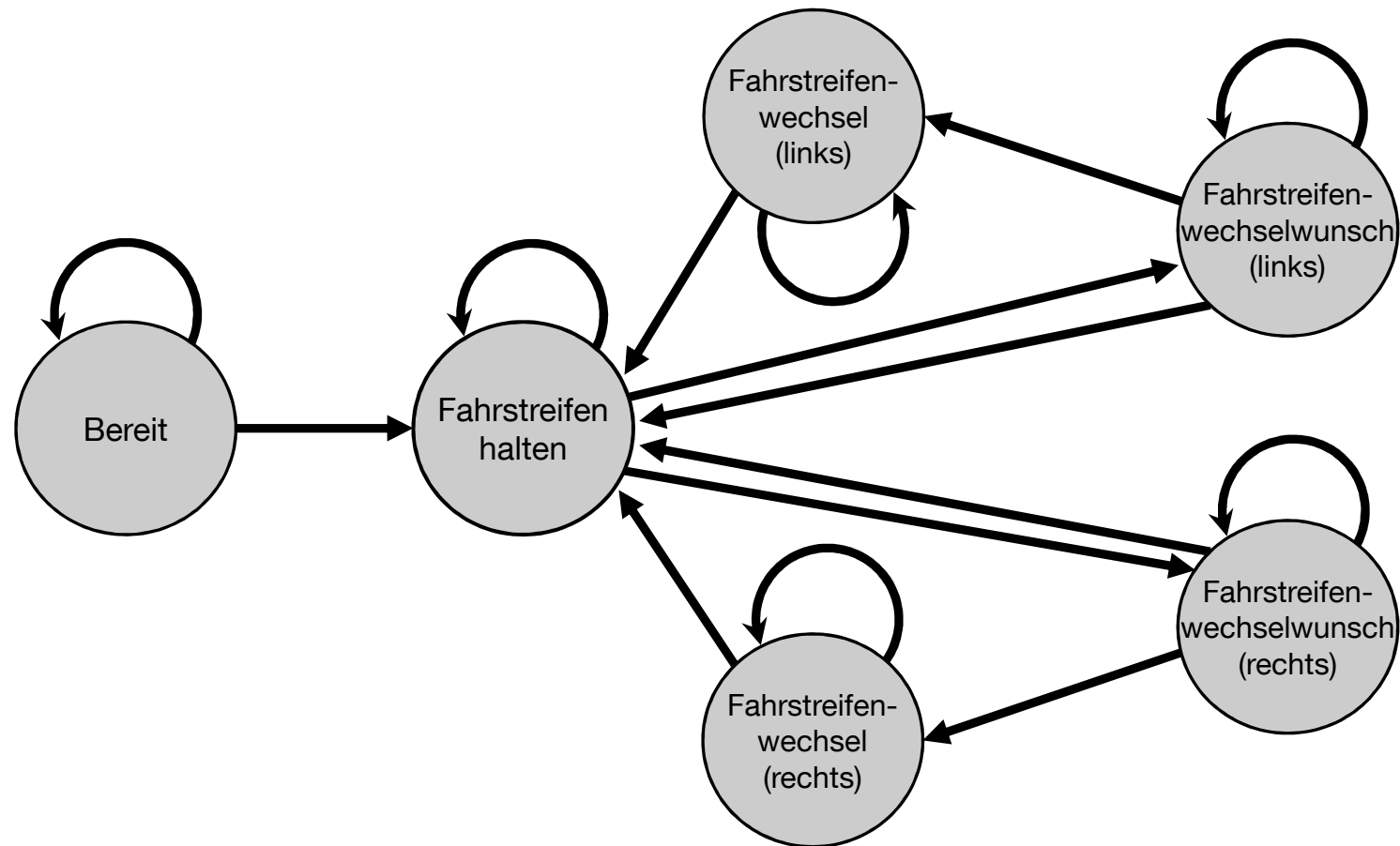
### Mathematisches Modell:

- Beschreibung durch tuple  $(S, E, A, F, \delta)$
- $s_1, s_2, s_3, \dots \in S$ : Menge der Zustände
- $e_1, e_2, e_3 \dots \in E$ : Menge der Inputs
- $a_1, a_2, a_3 \dots \in A$ : Menge der Aktionen
- $s_0 \in S$ : Initialer Zustand
- $F \in S$ : Menge finaler Zustände
- $\delta: S \times E \rightarrow S \times A$ : Übergangsfunktionen



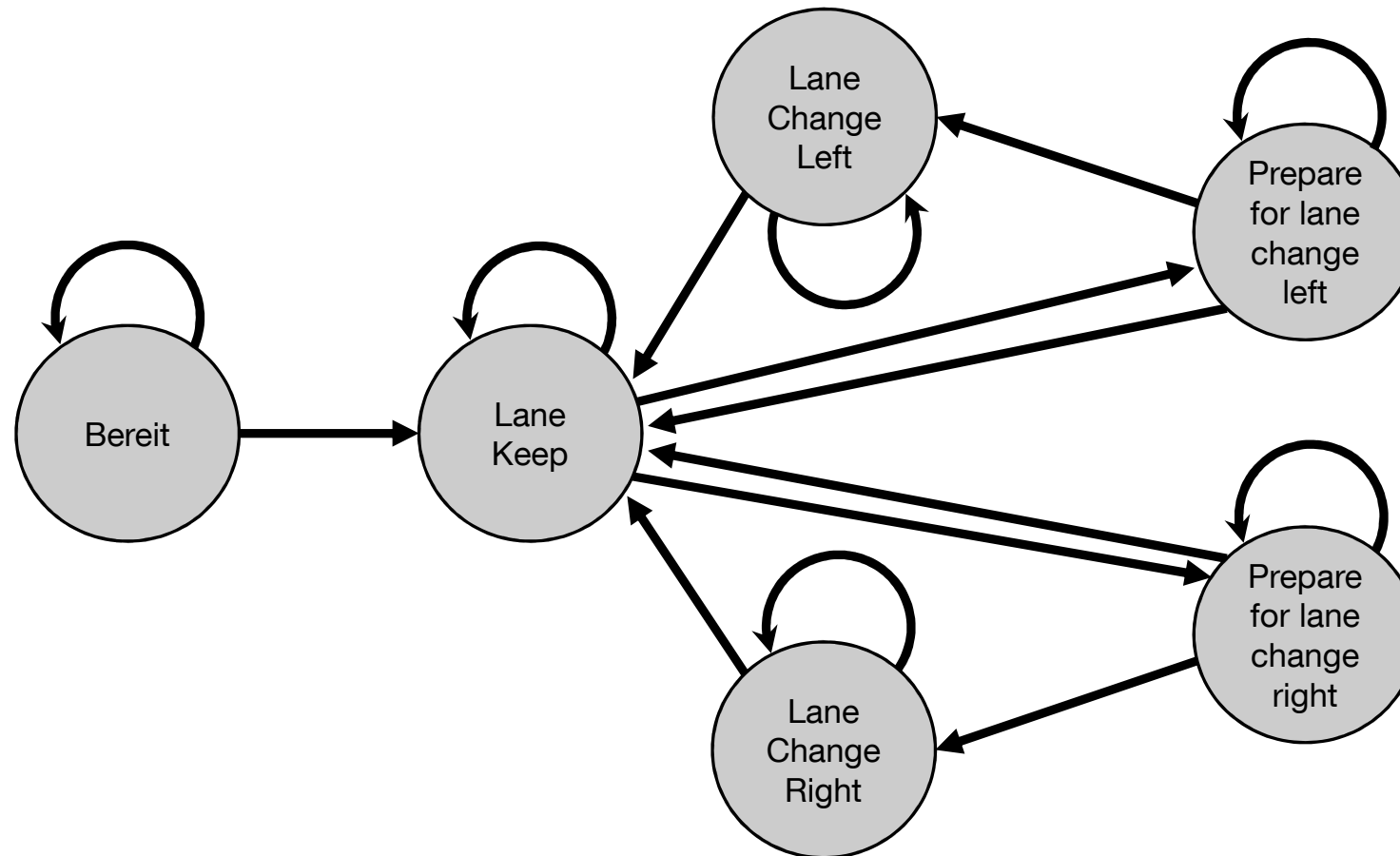
# Zustandsautomat

## Beispiel



# Zustandsautomat

## Beispiel



# Zustandsautomat – Ardelt

## Interne Systemzustände

	Querführung	Längsführung
0	Aus	Aus
1	Lane Keeping	DCC
2	LCGA (links)	ACC
3	LCGA (rechts)	LCGA
4	Lane Change (links)	Kritische Längsregelung
5	Lane Change (rechts)	
6	LC-Abbruch (links)	
7	LC-Abbruch (rechts)	
8	Anhaltetrajektorie	

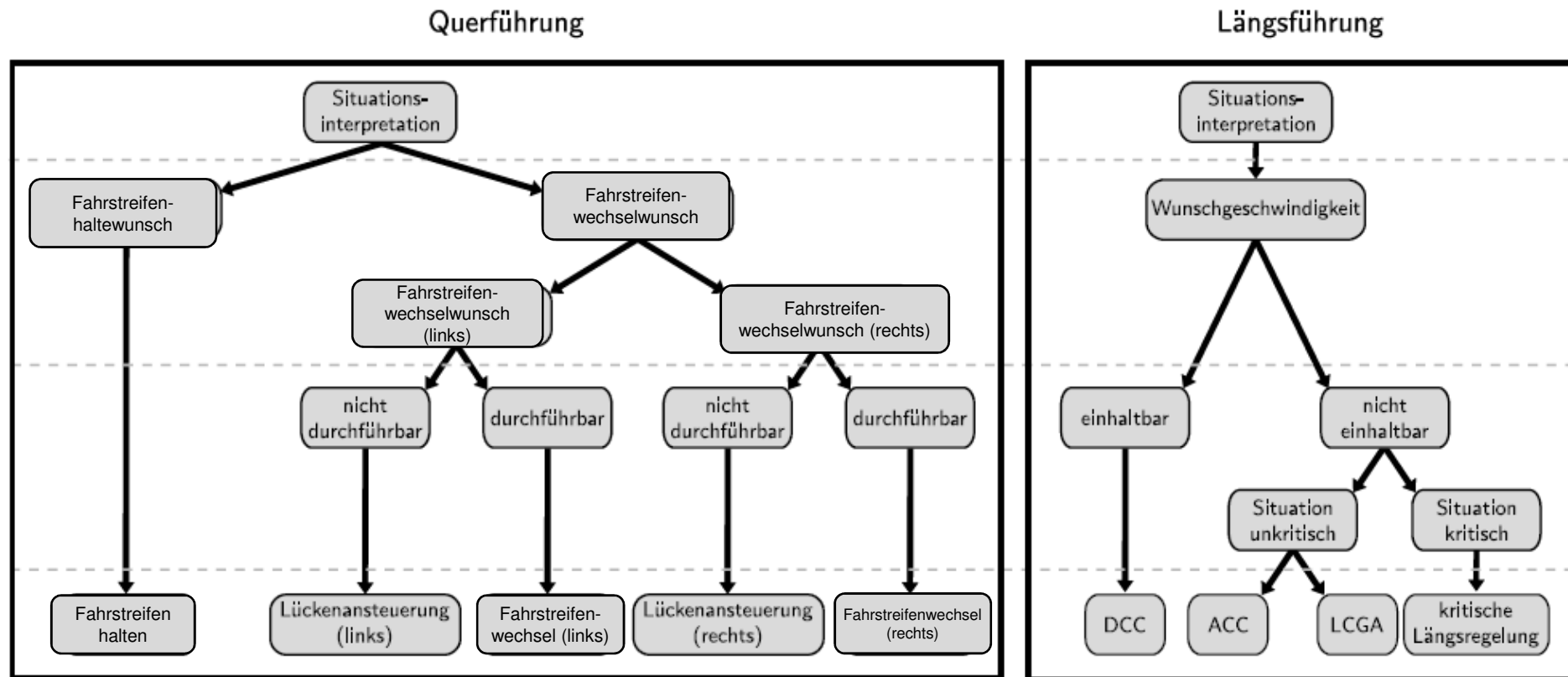
ACC: Adaptive Cruise Control  
DCC: Dynamic Cruise Control  
LCGA: Lane Change Gap Approaches

**Ardelt, Waldmann 2011**

# Zustandsautomat – Ardelt

使用决策树的分层决策过程

Hierarchischer Entscheidungsfindungsprozess mittels Entscheidungsbäumen



Trennung von Quer- und Längsführung ist im Hinblick auf hochautomatisiertes Fahren nicht sinnvoll!

Nach Ardelt, Waldmann 2011

## **Kommentarfolie**

### **Querführungsrelevante Zustände**

„Der Entscheidungsfindungsprozess verläuft in einer hierarchischen Abfolge. Aus der jeweiligen Situation wird ein Fahrwunsch generiert, welcher anschließend auf seine Durchführbarkeit hin überprüft wird. Je nach Durchführbarkeit wird ein entsprechender Zustand eingenommen, in welchem geeignete Maßnahmen für die jeweils vorliegende Situation eingeleitet werden. Ergibt sich aus der aktuellen Situation beispielsweise ein Fahrstreifenwechselwunsch, der nicht durchführbar ist, wird der Zustand Lückensteuerung (LCGA) in die jeweilige Richtung gewählt. In der Querführung kann das Eigenfahrzeug in diesem Zustand auf dem aktuellen Fahrstreifen geringfügig in Richtung des Zielfahrstreifen bewegt werden um somit einen Fahrstreifenwechselwunsch zu signalisieren.

Sobald ein Fahrstreifenwechsel durchführbar ist, wird der Entscheidungsbaum nochmal durchlaufen und wechselt in einen der beiden Fahrstreifenwechselzustände. Hierdurch wird das Automatennetzwerk veranlasst, auf oberster Ebene in den Fahrstreifenwechsel Strategie Automaten zu wechseln. Hier wird geprüft, ob der Fahrstreifenwechsel vollständig durchgeführt werden kann, oder eventuell abgebrochen werden muss. Wenn der Fahrstreifenwechsel vollständig durchgeführt oder abgebrochen wurde, wechselt das Netzwerk wieder in den vorherigen Automaten, in dem der Entscheidungsbaum der Querführung erneut durchlaufen wird.“

### **Längsführungsrelevante Zustände**

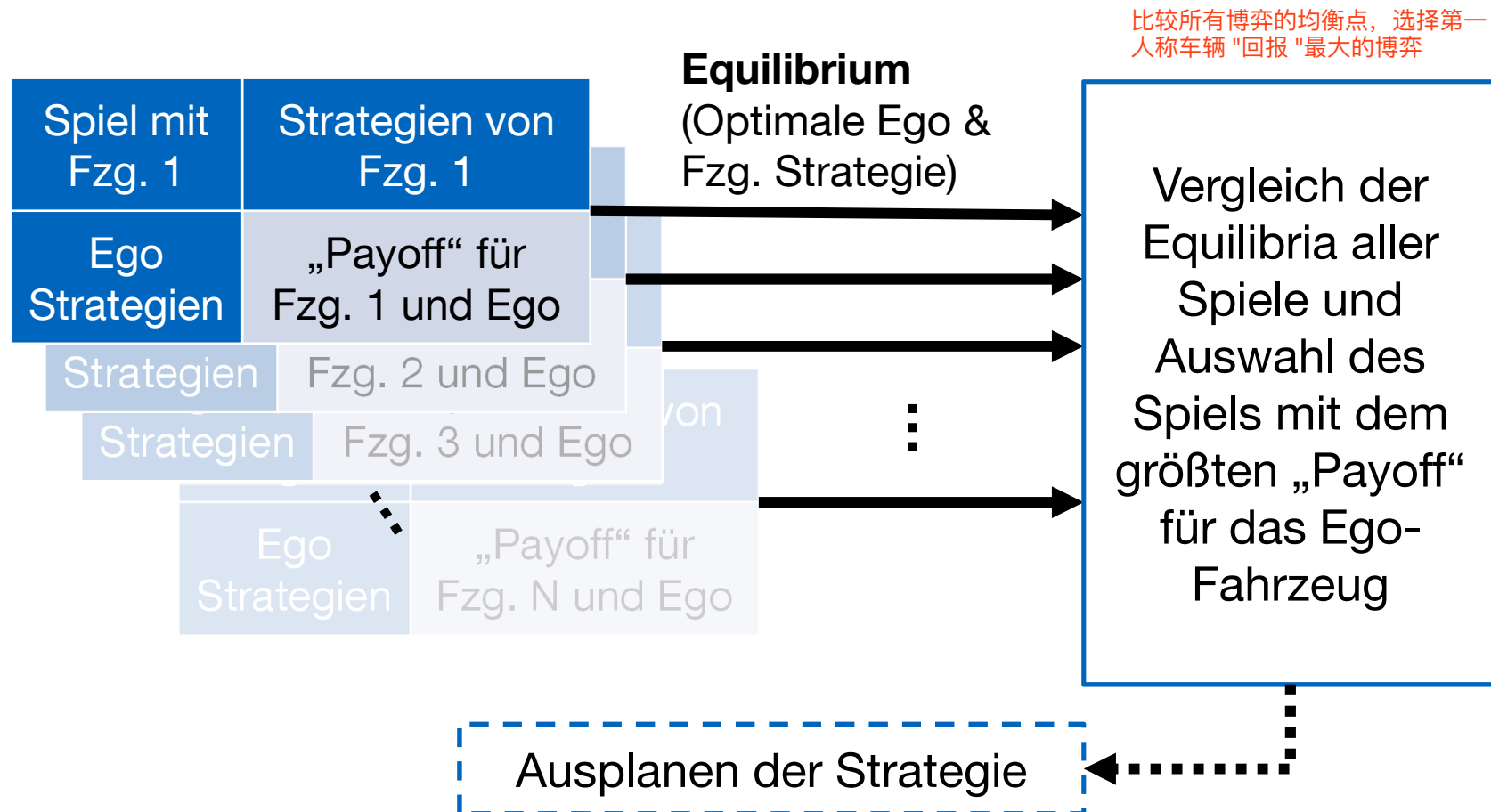
„Für die Längsführung wird in Abhängigkeit der vorliegenden Situation eine Wunschgeschwindigkeit generiert. Diese Geschwindigkeit wird entweder in dem Zustand DCC eingehalten oder sie muss aufgrund der Einhaltung eines Abstandes zu einem Zielfahrzeug angepasst werden.

Die Wahl des Zielfahrzeuges hängt von den aktuellen Systemzuständen und weiteren Kriterien (z. B. Sicherheitskriterien) aus den Eingangssignalen ab. Wird eine kritische Situation wie beispielsweise ein nahes Einschermanöver eines langsameren Fahrzeuges detektiert, ist das Eigenfahrzeug in der Lage, durch verstärktes Bremsen entsprechend zu reagieren. Liegt keine kritische Situation vor, wird entweder der Abstand mittels ACC Regelung, z. B. zu dem Vorderfahrzeug, eingehalten oder das Eigenfahrzeug wird in dem LCGA Zustand auf dem aktuellen Fahrstreifen neben einer geeigneten Verkehrslücke positioniert, um dadurch einen Fahrstreifenwechsel zu ermöglichen.“

**Ardelt, Waldmann 2011**

# Spieltheorie – Texas A&M University 2019

Verhaltensentscheidung bei Betrachtung mgl. Aktionen anderer Fahrzeuge



Angelehnt an: [ieeexplore.ieee.org/document/8815281](http://ieeexplore.ieee.org/document/8815281)



A 计划的（自我）和预测的时空轨迹

- 自我车辆（绿色）

- 外来车辆（红色）



B 时间点比较 (连线)，并计算与各自我轨迹行驶距离相关的风险函数

C 计算不同自我车辆轨迹的风险函数（以自由度 P 为参数）

D 转移到预测风险地图。地图上的标记点表示应避免的高风险区域。

# Predictive Risk Map – Damerow

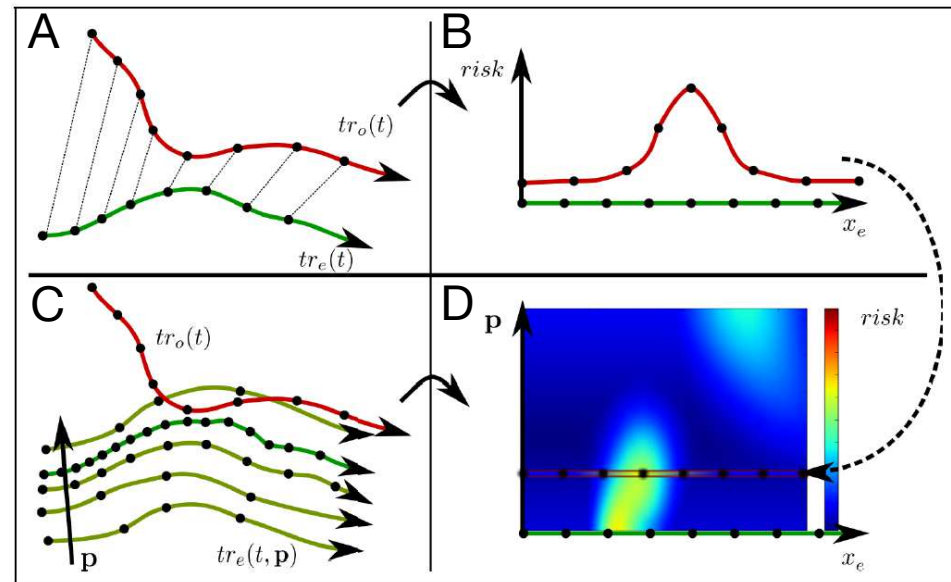
A Geplante (Ego) & prädizierte raumzeitliche Trajektorien

- Ego-Fahrzeug (grün)
- Fremdfahrzeug (rot)

B Vergleich von Zeitpunkten (Verbindungslinien) und Berechnung der Risikofunktion bezogen auf die zurückgelegte Strecke der jew. Ego-Trajektorie

C Berechnung der Risikofunktion für unterschiedliche Ego-Fahrzeug Trajektorien (parametriert mit Freiheitsgrad P)

D Überleitung in eine *Predictive Risk Map*. Markierte Punkte innerhalb der Karte kennzeichnen Bereiche hohen Risikos und sollten vermieden werden.



Damerow, IEEE 2014

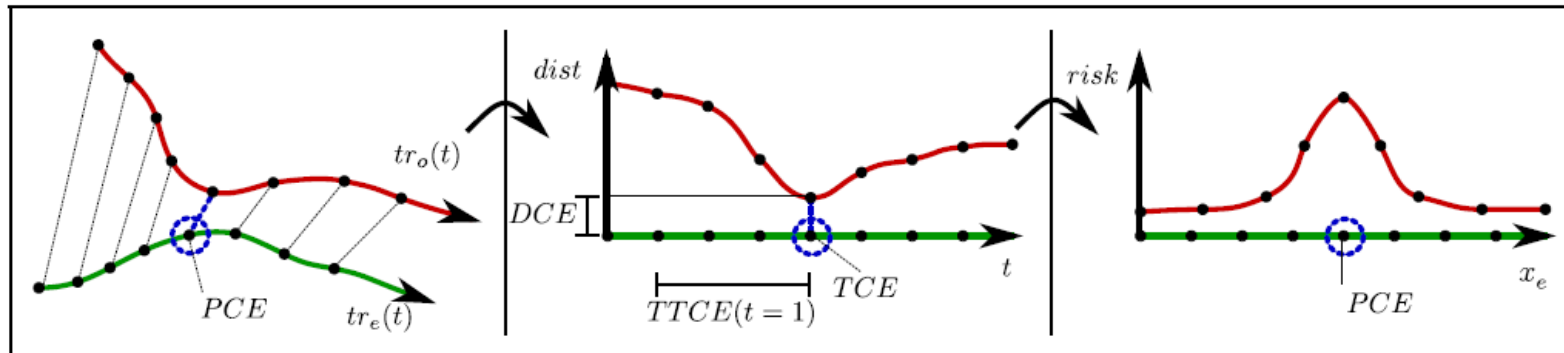
## Kommentarfolie

“To analyze different behavior alternatives of the ego car, we vary the ego-car trajectory systematically using its prediction parameters  $p$ . This could be e.g., the ego-car velocity  $p = v_e$  to evaluate different velocity alternatives. For each selection of  $p$ , we estimate the predicted trajectory and calculate the future risk function  $R(x_e; p)$ . Each of the gained risk functions can now be evaluated according to overall risk and efficiency considerations.

In Fig. C, we show a set of possible trajectories of the other traffic participant. From each of them, in interaction with the ego-car trajectory, we gain a risk function, and the set of risk functions is then composed into a predictive risk map that allows to localize the future risks for different ego-car behavior options (Fig. D). The risk maps can then be used for behavior planning, by searching for the most favorable path across the map from the current state to a desired target zone, considering risk and efficiency minimization constraints along the path, as illustrated in Fig. 3. This can be achieved by using standard planning algorithms or other minimization techniques.“

# Predictive Risk Map – Damerow

Berechnung der Risikofunktion

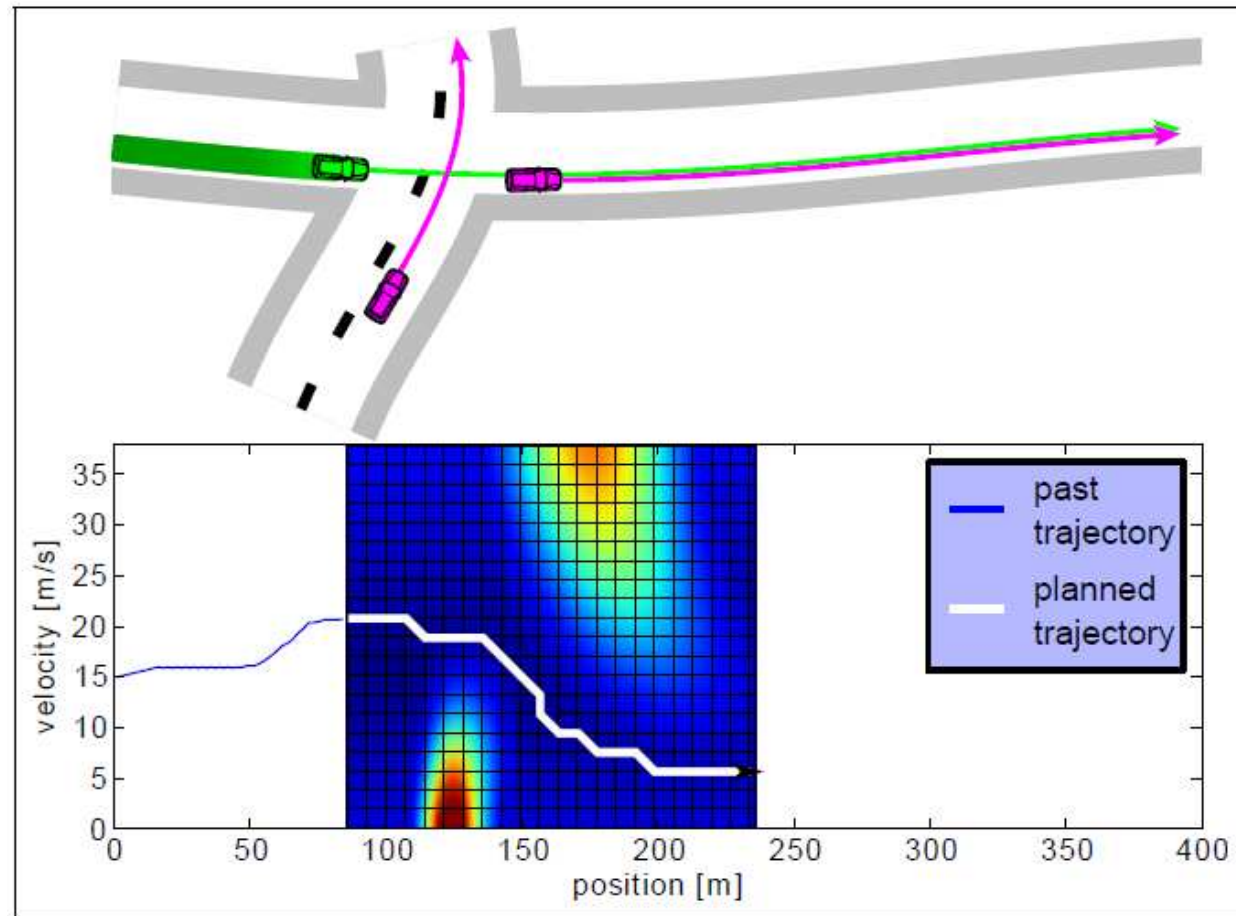


- DCE: Distance of Closest Encounter
- TCE: Time of Closest Encounter
- TTCE: Time To Closest Encounter
- PCE: Point of Closest Encounter

Damerow, IEEE 2014

# Predictive Risk Map – Damerow

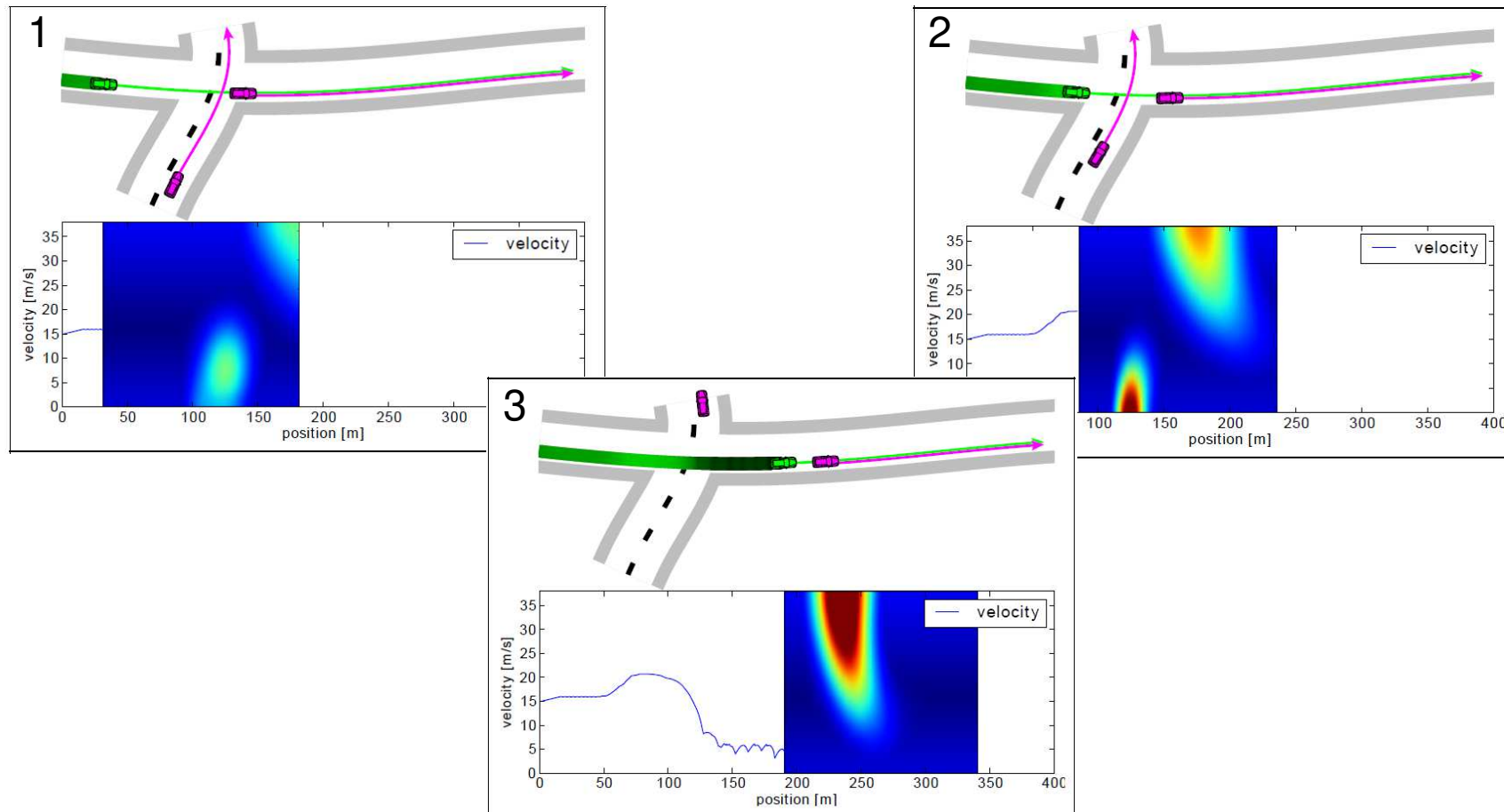
## Anwendungsfall



Damerow, IEEE 2014

# Predictive Risk Map – Damerow

## Anwendungsfall



# Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
(Domagoj Majstorovic, M.Sc.)

## Agenda

### 6 Funktionale Systemarchitektur und Aktorik

#### 6.1 Überblick Funktionale Systemarchitektur

##### 6.1.1 ACC / HC

##### 6.1.2 Beispiele Systemarchitektur

#### 6.2 Planung

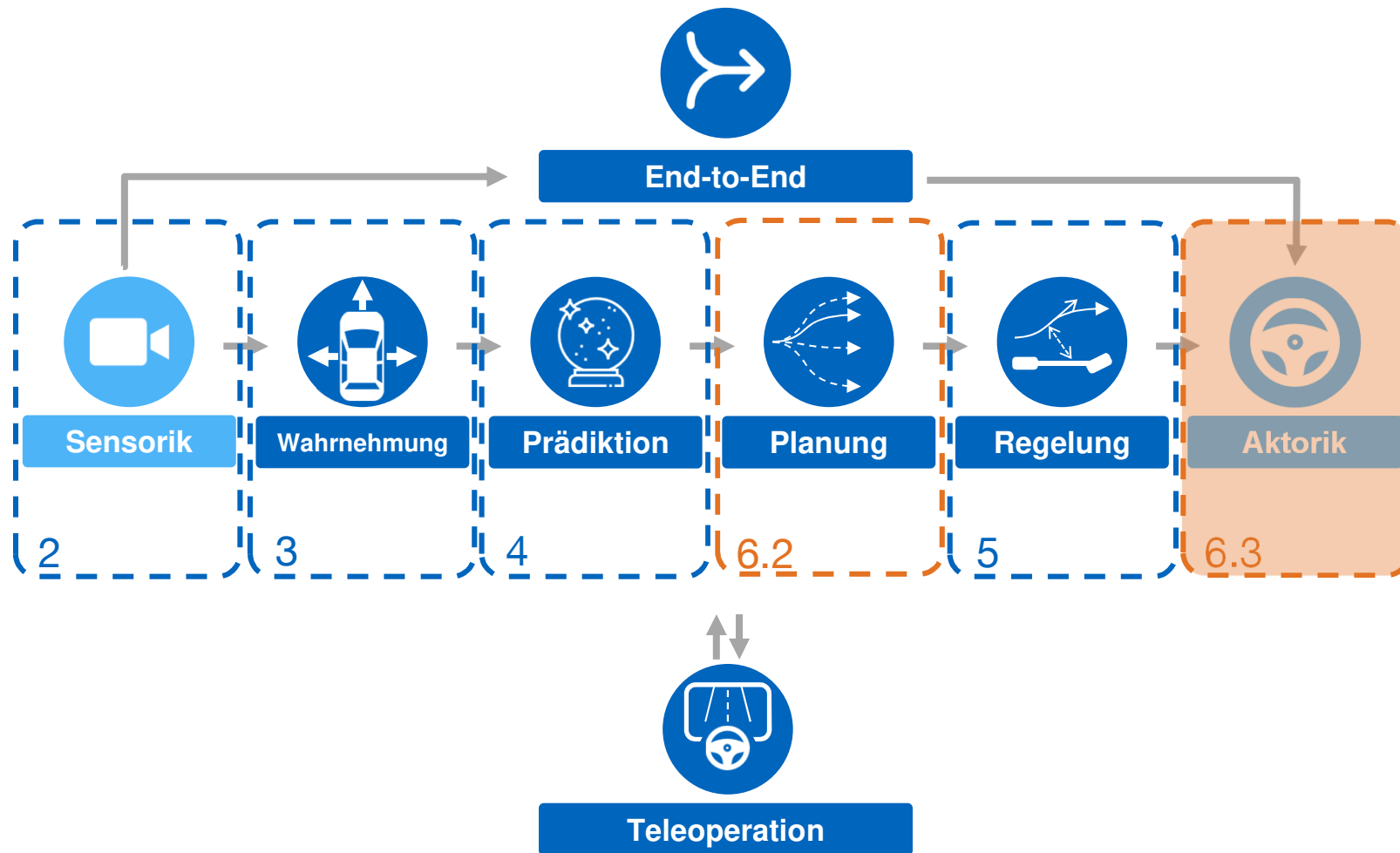
##### 6.2.1 Situationserfassung / -interpretation

##### 6.2.2 Verhaltensgenerierung

#### 6.3 Aktorik



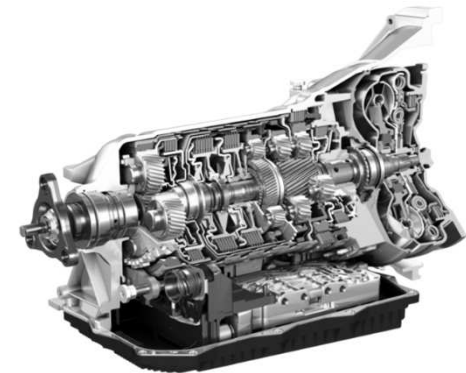
# Funktionale Systemarchitektur | Aktorik



# Gaspedal, Automatikgetriebe, BEV – by-wire

无论车辆的驱动概念如何，驱动装置通常都是由电线控制的

- Unabhängig vom Antriebskonzept des Fahrzeuges, die Ansteuerung des Antriebs erfolgt in der Regel by-wire



Wikipedia: Gaspedal, Volkswagen, ZF



# Gaspedal, Automatikgetriebe, BEV – by-wire

- Anforderung: Gleiche Ausfallsicherheit wie bei konventionellen Systemen
- Aber: komplexere Systeme neigen zu häufigeren Ausfällen
- Möglichkeiten zur Risikominimierung:
  - Redundanz: Zwei oder mehr **gleichartige** Systeme erfüllen die gleiche Aufgabe
  - Diversität: Zwei oder mehr **verschiedenartige** Systeme erfüllen dieselbe Aufgabe
  - Mehrheitsentscheid: Drei oder mehr **gleich-** oder **verschiedenartige** Systeme erfüllen dieselbe Aufgabe

- 要求：可靠性与传统系统相同

- 但是：更复杂的系统往往故障更频繁

- 将风险降至最低的备选方案：

- 冗余：两个或多个类似系统完成相同的任务

- 多样性：两个或多个不同的系统完成相同的任务

- 多数决定：三个或更多相同或不同类型的系统完成同一任务

- 术语定义: "再生制动系统":

可将混合动力或电动汽车的电力传动系统纳入减速过程, 从而回收动能的系统。

- 为了最大限度地回收能量, 需要将液压制动效果与驾驶员对制动踏板的输入解耦原因



# Regenerative Bremssysteme

- 可用的再生制动扭矩不恒定

- 保持制动力分布合理, 以实现稳定的驾驶状态

- 通过完全电能储存消除发电机效应

## ■ **Begriffsdefinition:** „Regenerative Bremssysteme“:

Systeme, die den elektrischen Antriebsstrang von Hybrid- oder Elektrofahrzeugen in die Verzögerung mit einbeziehen können und dadurch Bewegungsenergie zurückgewinnen.

- Für bestmögliche Energierückgewinnung Entkopplung der hydraulischen Bremswirkung von der Fahrereingabe am Bremspedal erforderlich

Gründe:

- Verfügbares generatorisches Bremsmoment nicht konstant
- Erhaltung einer def. Bremskraftverteilung für stabilen Fahrzustand
- Entfall der Generatorwirkung bei vollem elektrischen Energiespeicher

# Regenerative Bremssysteme

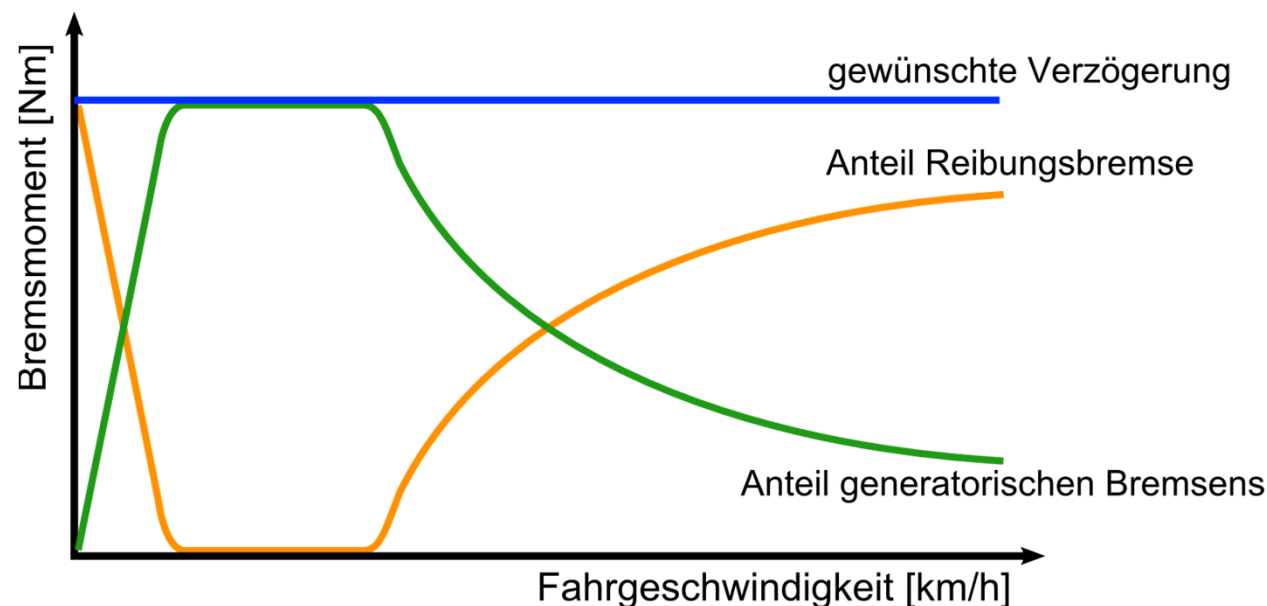
再生制动系统

- 术语定义: "混合制动":

将所需的总制动扭矩在再生减速扭矩和机械摩擦制动扭矩之间进行可变分配。

## ■ Begriffsdefinition: „Brake-Blending“:

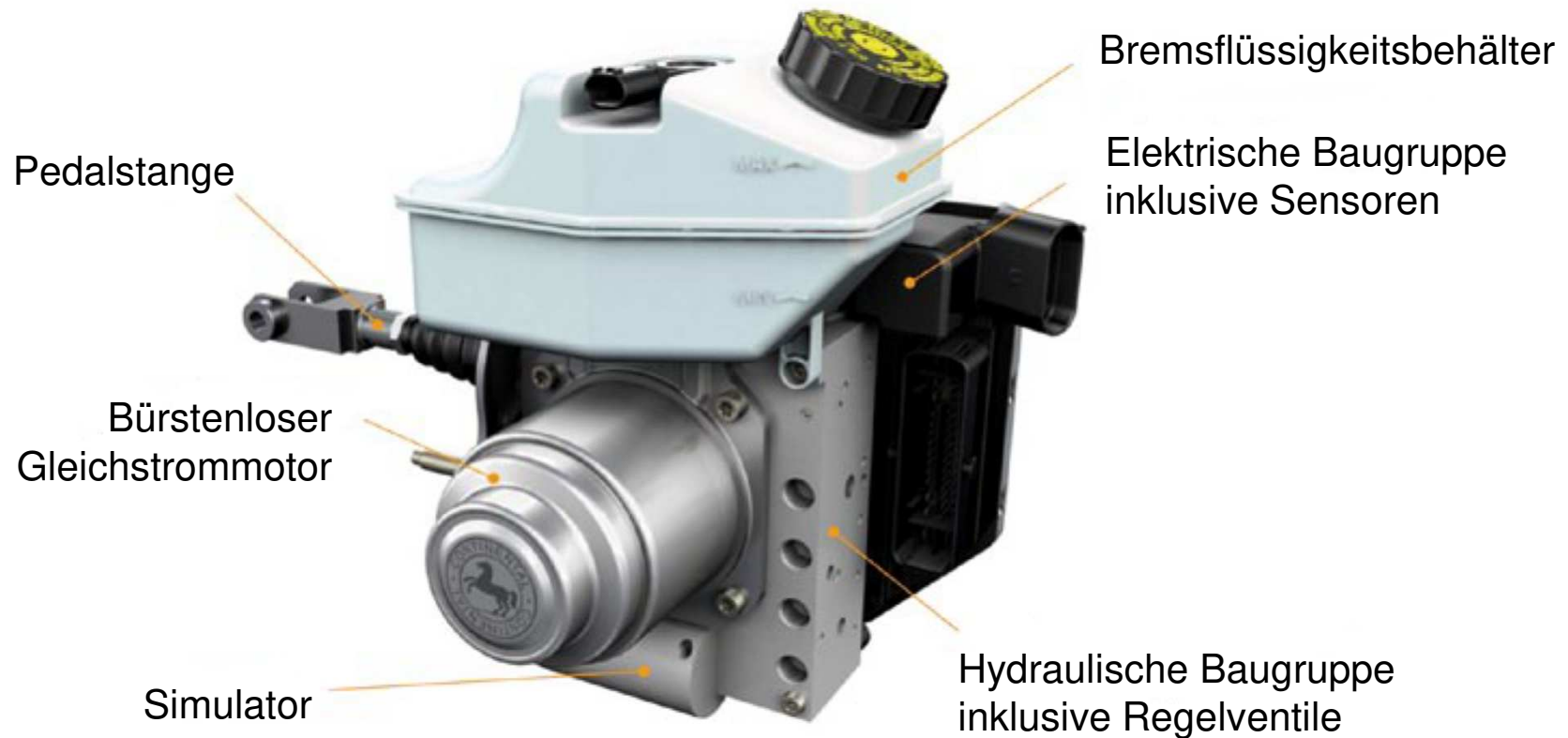
Variable Verteilung des erforderlichen Gesamtbremsmoments auf ein generatorisches Verzögerungsmoment und ein mechanisches Reibbremsmoment.



nach ATZ 08/2012

# Beispiel vollständig blendingfähiges Bremssystem

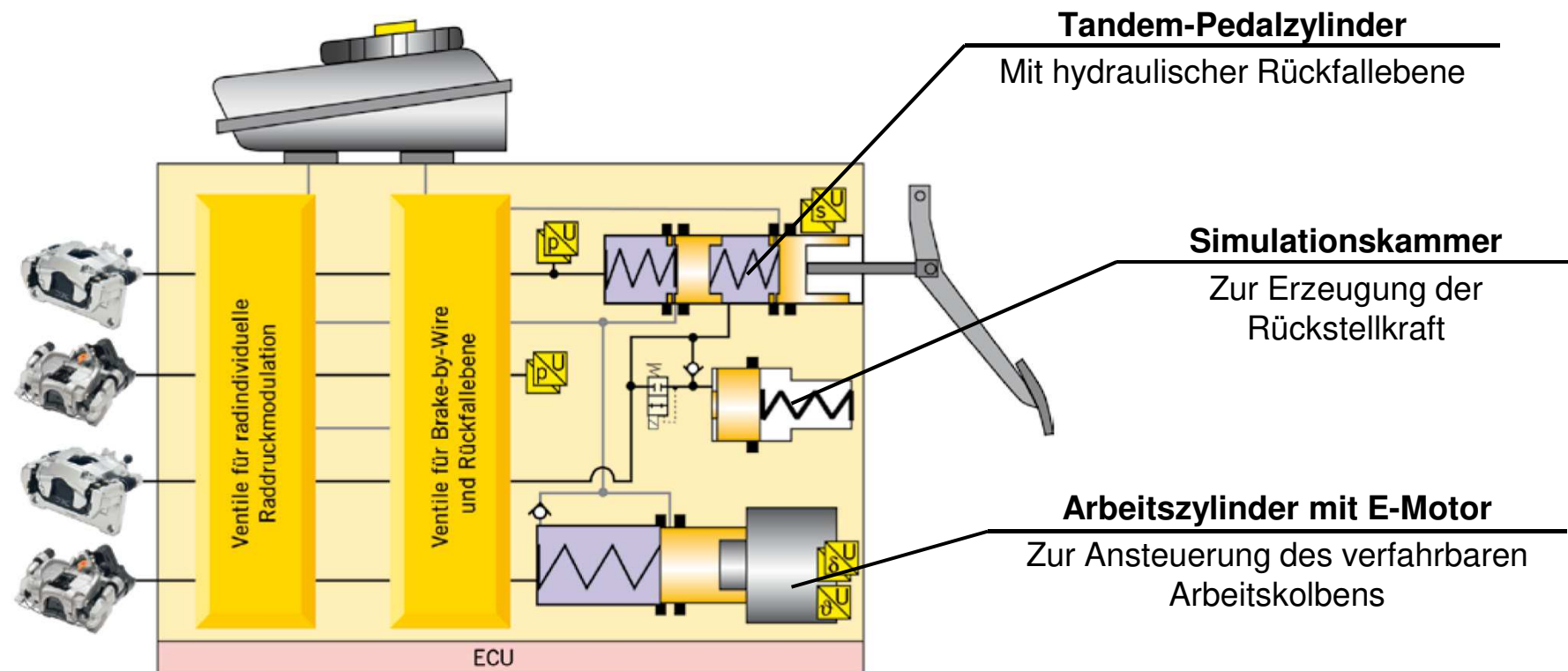
Continental MK C1



ATZ 07-08/2012

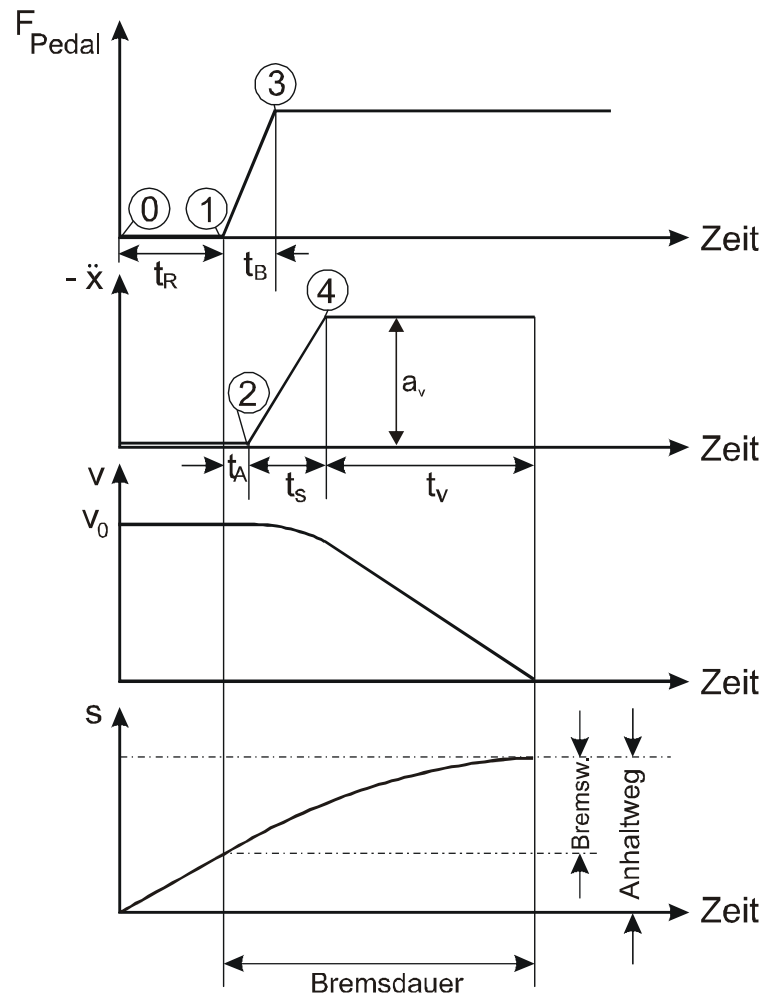
# Beispiel vollständig blendingfähiges Bremssystem

Continental MK C1 – schematischer Aufbau



ATZ 07-08/2012

# Ablauf eines Bremsvorganges



0 – 1:  $t_R$  Reaktions- u. Umsetzzeit  
( $\leq 0,8$  s)

1 – 3:  $t_B$  Betätigungsschwelldauer  
( $\leq 0,2$  s)

1 – 2:  $t_A$  Anlegezeit  
( $\approx 0$  s)

2 – 4:  $t_S$  Bremsschwelldauer  
( $\leq 0,2$  s)

4 – 5:  $t_V$  Vollbremsphase

Anmerkung:  
Bezeichnungen orientieren sich an der hydraulischen Reibungsbremse. Die Zusammenhänge gelten für andere Bremssysteme in ähnlicher Weise.

# Weiteres Beispiel zur Bremswegverkürzung

## VW Pyrobrake

在发生不可避免的碰撞之前，与烟火式皮带张紧器的触发方式相同。在 80 毫秒内启动紧急制动。

- Wird analog zu pyrotechnischen Gurtspannern vor einer unvermeidbaren Kollision ausgelöst. Leitet innerhalb von 80 ms eine Vollbremsung ein.



Bild: heise autos

# Funktionsprinzip der elektromechanischen Lenkung

$$\text{Zahnstangenkraft} = i_{\text{Lenk}} * \text{Drehstabmoment} + i_{\text{Servo}} * \text{Motormoment}$$

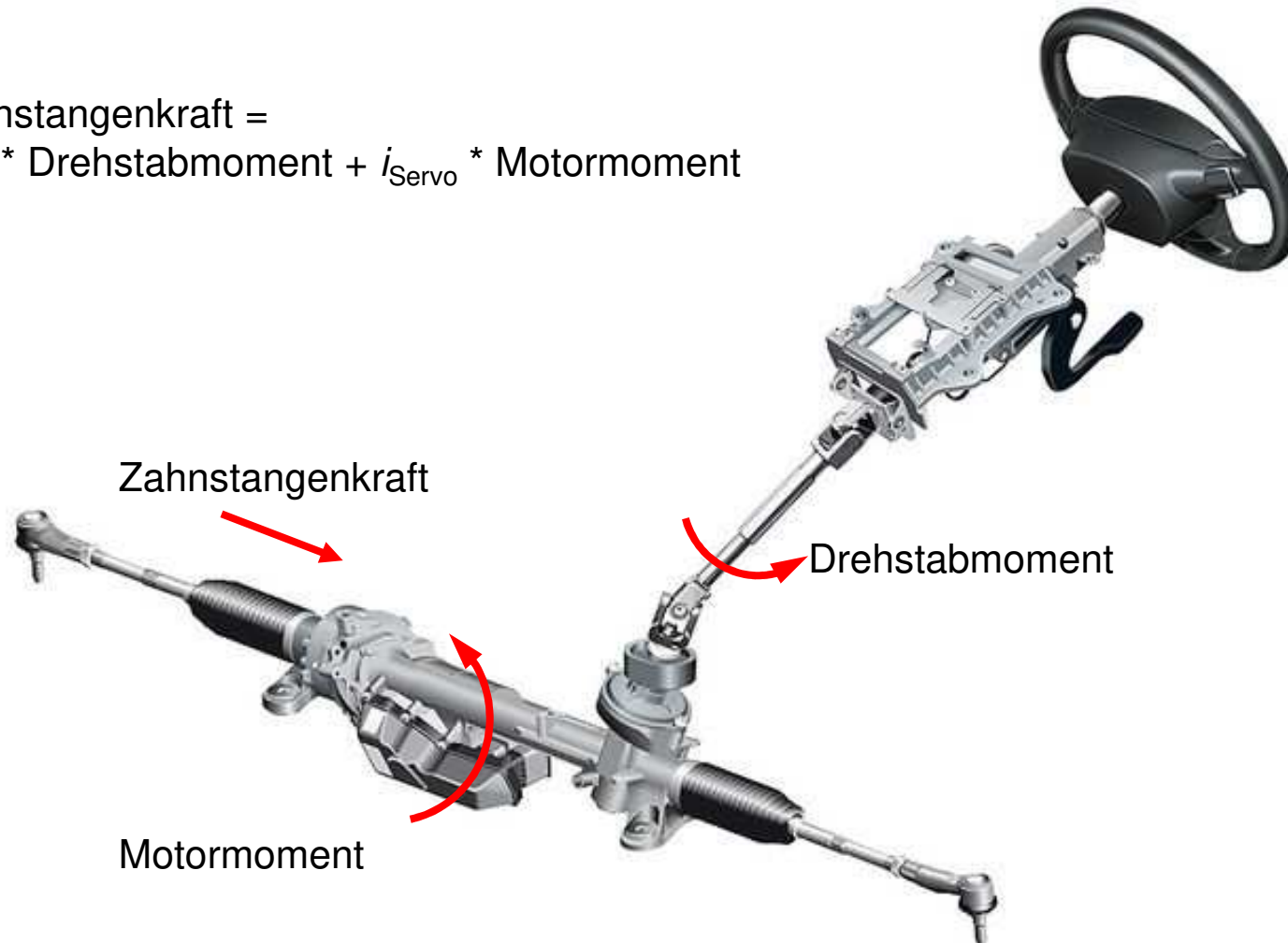
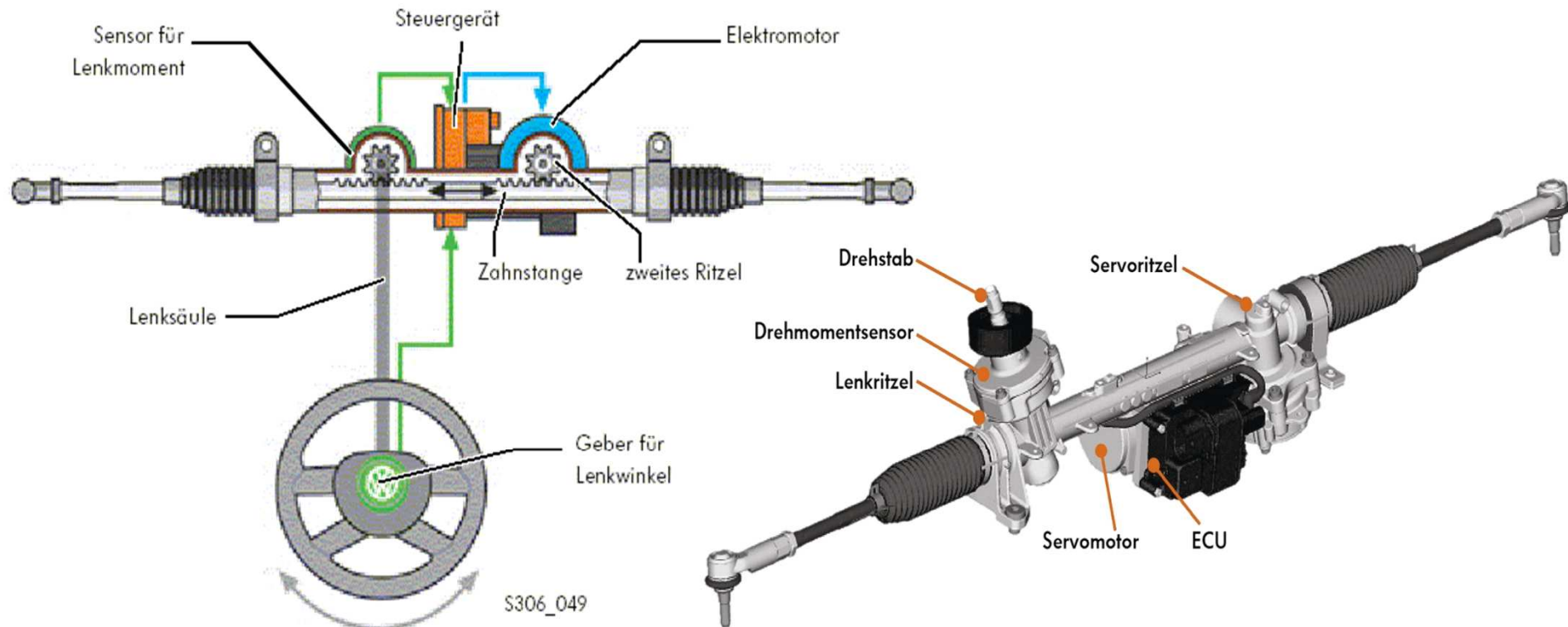


Bild: auto-motor-und-sport.de, 2013



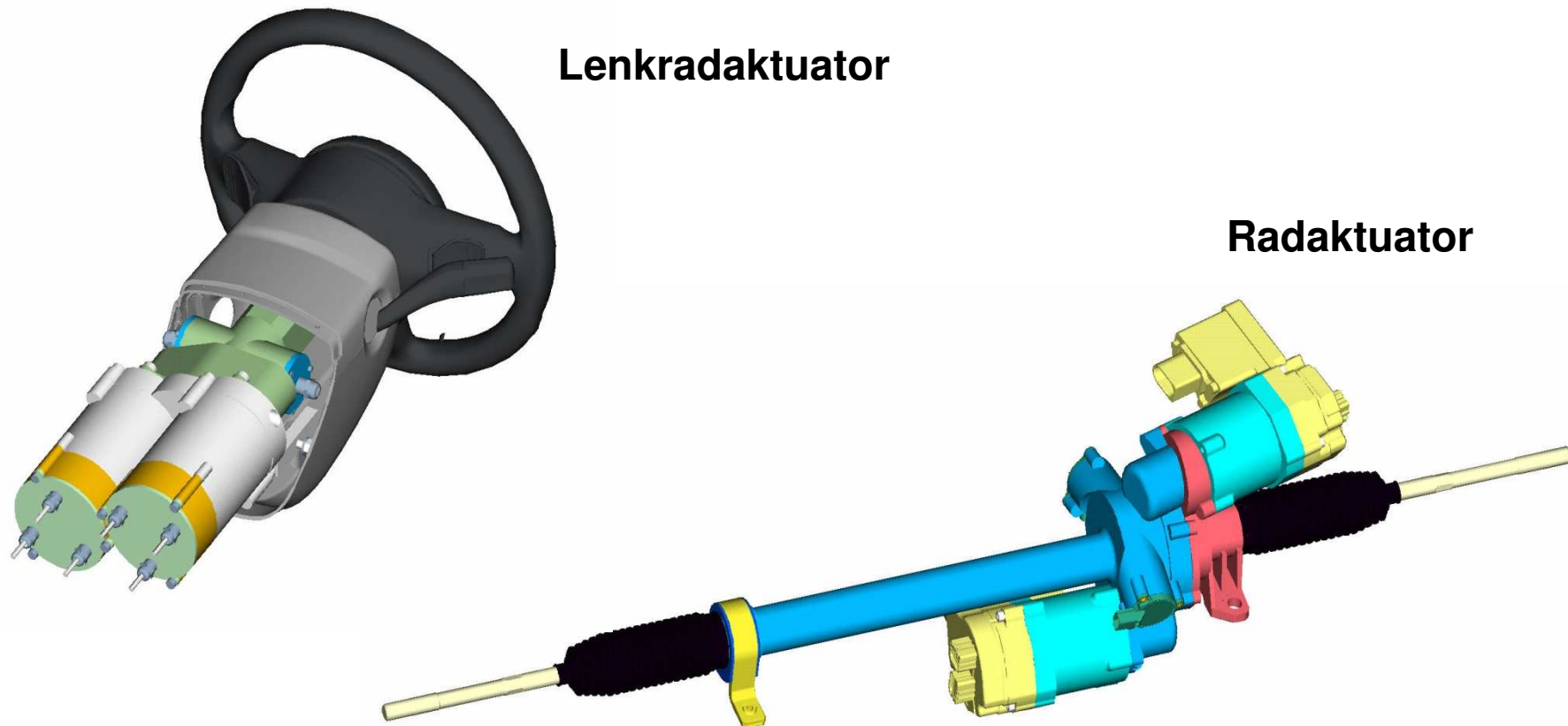
# Elektromechanische Lenkung (bis 1400 kg VA-Last)



DB03 60482

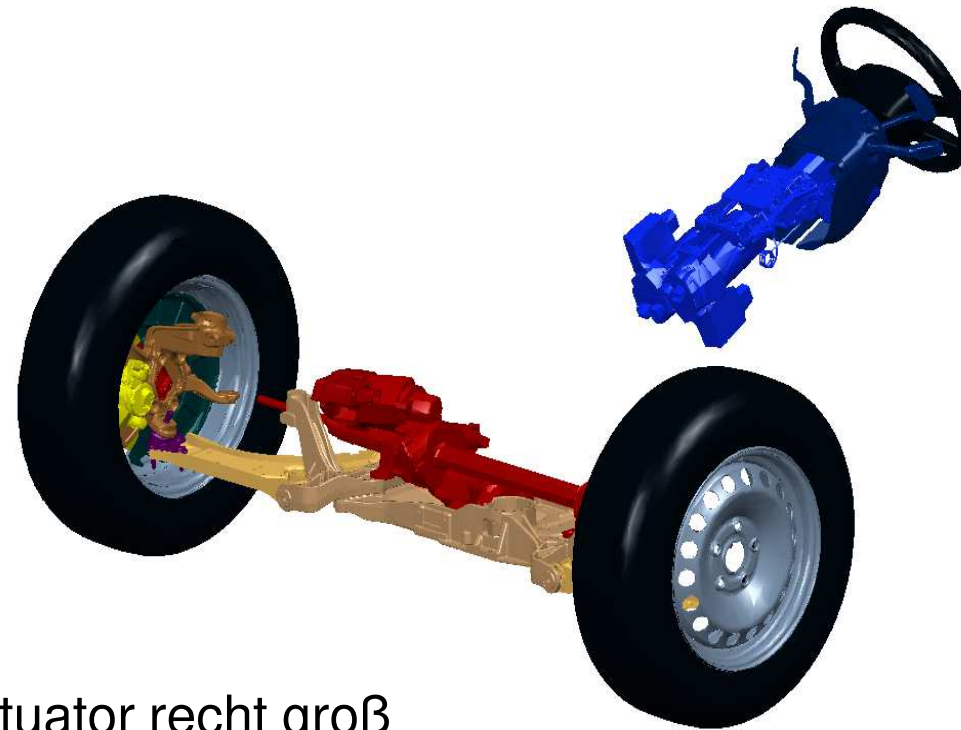
- Mittels besonderer Maßnahmen (z.B. achsparalleler Antrieb) bis 1700 kg VA-Last einsetzbar

# Steer-by-wire elektrisch (ab ca. 1000 kg VA-Last höhere Spannungslage Bordnetz)



**+30% Mehrbedarf für Dynamik = 30% weniger Achslast**

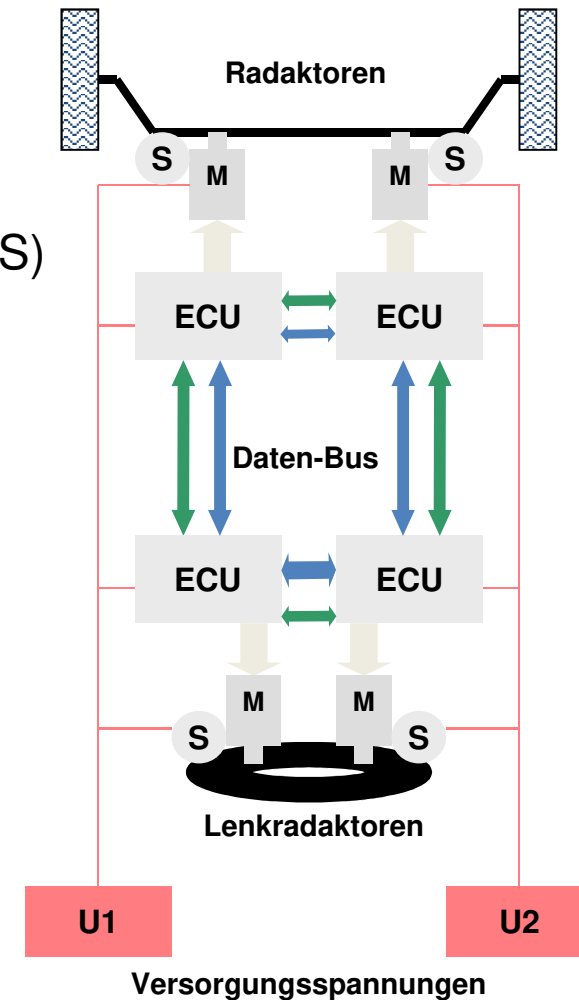
# Package



- Lenkradaktuator recht groß
- aus Kosten- und Technikgründen müssen beide Räder verbunden bleiben
- + Modularität möglich
- + Bauraumvorteil im Motorraum

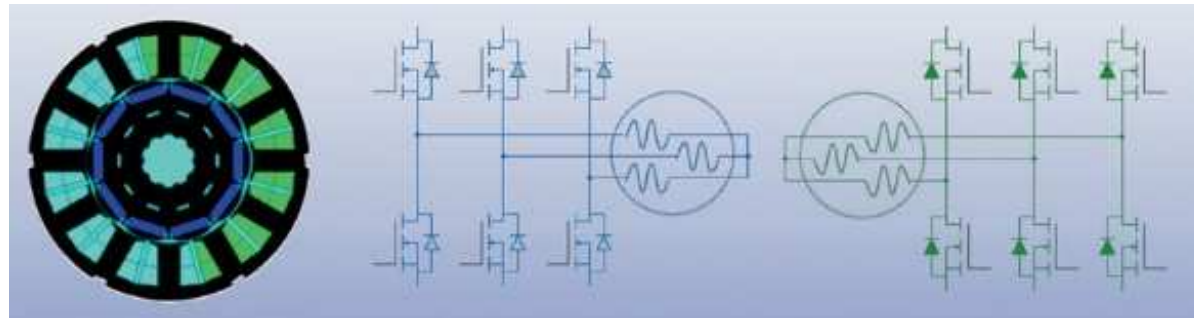
# Kosten

- **Steer-by-wire (SbW) elektrisch:**
  - 4 Motoren und Sensoren statt 1 Motor (EPS)
  - 4 ECU statt 1 ECU
  - mindestens 300 € Mehrkosten
  - tragen kleine Fahrzeuge nicht
  
- **SbW hydraulisch:**
  - 2 Hydraulikventile, Pumpen und Speicher statt 1x Hydraulikventile, Pumpe + Planetengetriebe
  - 3 ECU statt 1 (ADS oder IPAS)
  - mindestens 300 € Mehrkosten

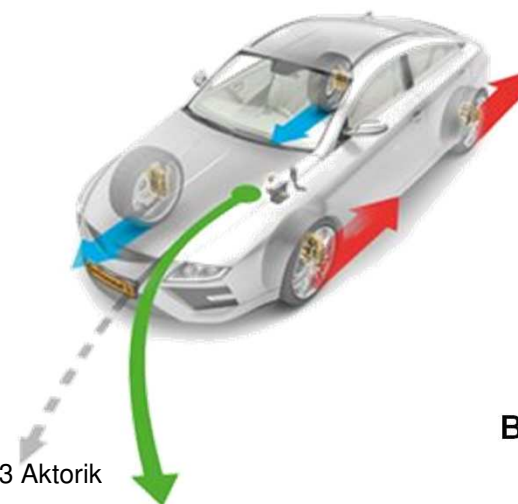


# Steer-by-wire – alternative Redundanz Konzepte

- Motor mit zwei getrennten Wicklungen



- Torque Vectoring durch Antriebsmotoren eines Elektrofahrzeugs oder Rad-spezifisches Bremsen



- 带两个独立绕组的电机

- 电动汽车驱动电机的转矩矢量控制或车轮专用制动器

## **Kommentarfolie**

### **Kosten: Entwicklungskosten/Rückstellungen**

Etliche Mio. € Prototypenphase

Mehr als 200 Mio. € Serienphase (erheblich höher als EHB-Niveau – kein mechanischer Durchgriff mehr)

→ bei 200.000 Fahrzeugen ca. 1000 €/Fahrzeug!!!!

Kapazität und Know how müsste für Serie aufgebaut werden

Hohe Rückstellungen für Produkthaftung

### **Entwicklungsrisiko**

Derzeit kein Zulieferer bereit

SIL 3 Level für Entwicklungsprozess müsste aufgebaut werden, derzeit nur QS 9000

Trauma durch EHB (Pressemeldung 2003):

„Stuttgart (dpa-AFX) – Ein elektronisches Problem in der High-Tech-Bremse SBC hat bei Mercedes-Benz zu einer der größten Rückrufaktionen der vergangenen Jahre geführt. Rund 680.000

Fahrzeuge der E- und SL-Klasse müssen zu einem Check in die Werkstatt. In Deutschland sind nach Angaben eines DaimlerChrysler-Sprechers von heute rund 225.000 Fahrzeuge betroffen.“

### **Kundendienst**

Steuergeräte haben nur begrenzte Einsatzdauer – evtl. Tausch im Alter erforderlich

Batterien werden Sicherheitsteile

# Lenkfunktionen der elektromechanischen Lenkung

Grund-Lenkfunktionen (LF)	Erweiterte Lenkfunktionen (eLF)	Funktionen auf Fahrzeugebene
Servounterstützung	Aktiver Rücklauf	Parklenkassistent
Reibungskompensation	Geradeauslaufkorrektur	Fahrstreifenführung (Lane-Keeping-System)
Trägheitskompensation		Fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung
Dämpfung		

→ Nachbildung des Lenkverhaltens einer hydraulischen Servolenkung

# EPS-LF / Grundlenkfunktionen / Servounterstützung

$$\text{Zahnstangenkraft} = i_{\text{Lenk}} * \text{Drehstabmoment} + i_{\text{Servo}} * \text{Motormoment}$$

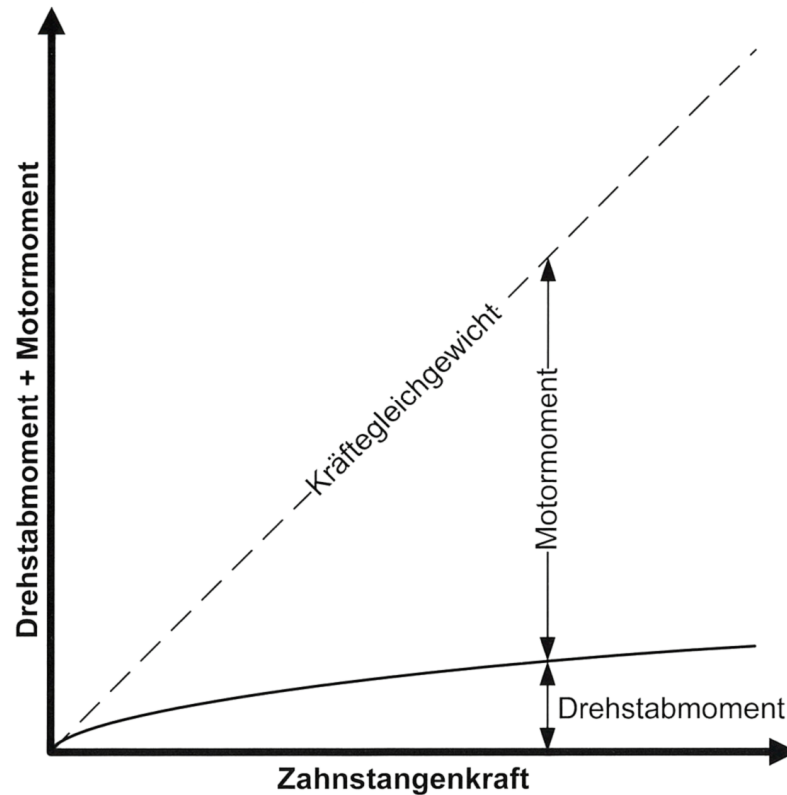


Bild 1: Kräftegleichgewicht zwischen Zahnstangenkraft und der Summe aus Motormoment und Drehstabmoment

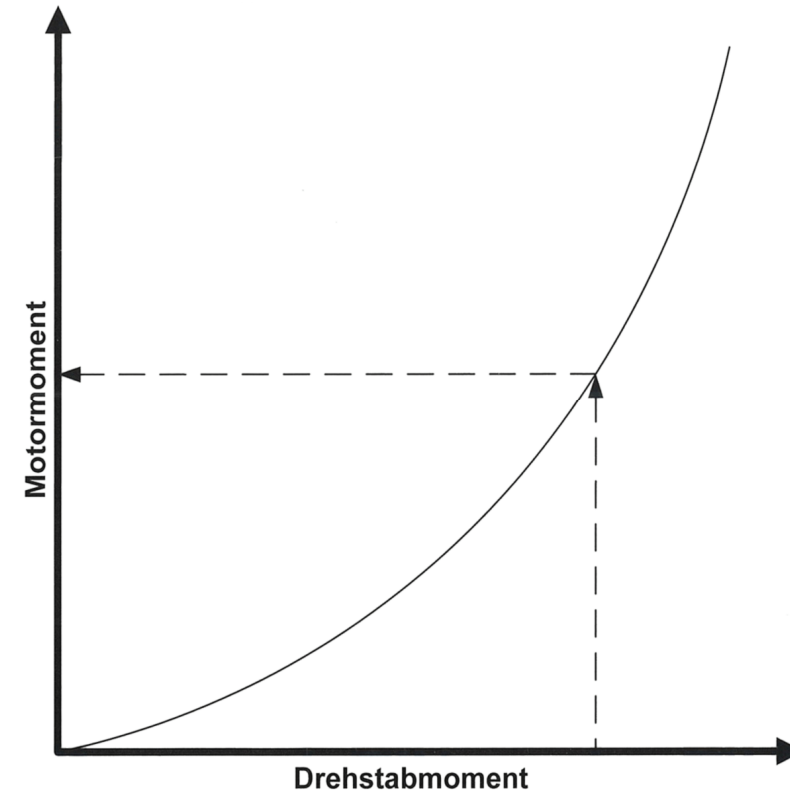


Bild 2: Unterstützungskennlinie zeigt das Motormoment als Funktion des Drehstabmoments

Lenkungsbandbuch, 2011



# EPS-LF / Grundlenkfunktionen / Reibungs- und Trägheitskompensation

- Kräftesumme (siehe EPS / Grundlenkfunktionen / Servounterstützung) wurde stationär, ohne Berücksichtigung von Reibung und Trägheiten gebildet
- Reibungskompensation:
  - In Abhängigkeit des aktuellen Bewegungszustandes und des angeforderten Motormoments wird ein entsprechendes Kompensationsmoment gestellt (*=Reibungsmodell*)
- Trägheitskompensation:
  - EPS-typische Übersetzungen führen zu einer trägen Masse von mehreren hundert Kilogramm (bezogen auf die Zahnstange) → dynamische Anregungen von der Zahnstange wirken sich nur wenig auf das Drehstabsmoment aus
  - Rotorbeschleunigung des Aktors und die Trägheiten im Lenksystem werden in einem *Dynamikmodell* berücksichtigt → Kompensationsmoment

- 在不考虑摩擦和惯性的情况下，静态计算总力（见 EPS / 基本转向功能 / 伺服支持）。

摩擦补偿：

- 根据当前运动状态和所需电机扭矩，设置相应的补偿扭矩（= 摩擦模型）

惯性补偿：

- EPS 的典型齿轮比会导致几百公斤的惯性质量（相对于齿条而言）。来自齿条的动态激励对扭杆扭矩的影响很小。
- 在动态模型中考虑执行器的转子加速度和转向系统的惯性 补偿扭矩

# EPS-LF / Grundlenkfunktionen / Dämpfung

- Reibungsmodell und Dynamikmodell prinzipiell fehlerbehaftet → das Lenksystem reagiert damit sehr empfindlich auf Störungen im Kräftegleichgewicht → Straßenanregungen führen zur heftigen Beschleunigungen, die vom Fahrer als Stößigkeit wahrgenommen werden
- Lösung: künstliche Bedämpfung des Systems (Aktoransteuerung)
- Hoher Applikationsaufwand bei der Abstimmung der Dämpfungsfunktion

- 摩擦模型和动力学模型存在根本性缺陷，因此转向系统对力平衡的干扰反应非常敏感 路面激励会导致剧烈加速，驾驶员会感觉到颠簸
- 解决方案：对系统进行人工阻尼（执行器控制）
- 调整阻尼功能的工作量大

# Lenkfunktionen der elektromechanischen Lenkung (EPS)

Grund-Lenkfunktionen (LF)	Erweiterte Lenkfunktionen (eLF)	Funktionen auf Fahrzeugebene
Servounterstützung	Aktiver Rücklauf	Parklenkassistent
Reibungskompensation	Geradeauslaufkorrektur	Fahrstreifenführung (Lane-Keeping-System)
Trägheitskompensation		Fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung
Dämpfung		

→ Zusätzliche Möglichkeiten der EPS

- 主动返回

- EPS 电机可根据方向盘角度和方向盘移动情况，在直行方向上提供额外扭矩



直线修正

- 即使路面总是倾斜，驾驶员也能在直线行驶时保持方向盘不产生扭矩

- 在发动机扭矩较高时，对不同长度的传动轴的偏斜进行补偿

- 取代额外的中间轴

## EPS-eLF / Erweiterte Lenkfunktionen

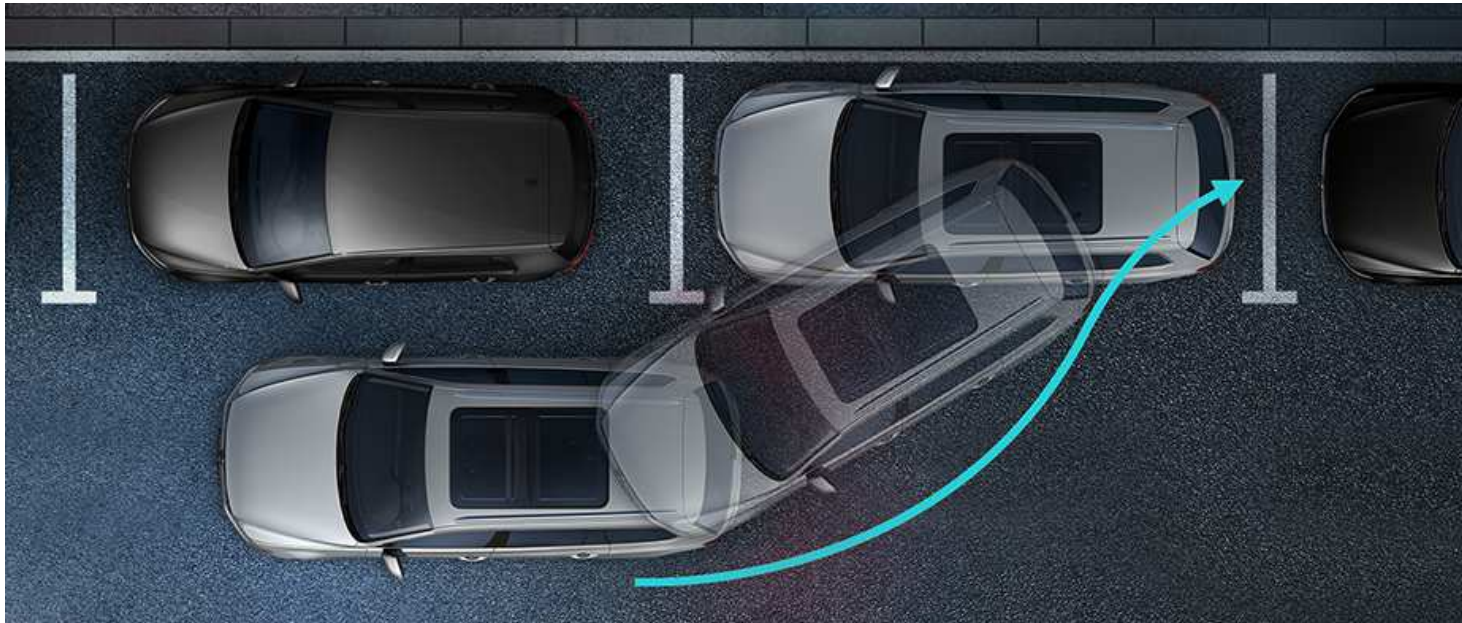
- Aktiver Rücklauf
  - EPS-Motor stellt in Abhängigkeit von Lenkradwinkel und Lenkradbewegung zusätzliches Moment in Richtung Geradeausfahrt
- Geradeauslaufkorrektur
  - Damit kann der Fahrer das Lenkrad bei Geradeausfahrt, auch bei stets vorhandener Fahrbahnneigung, momentenfrei halten
- Kompensation von Schiefziehen bei unterschiedlich langen Antriebswellen bei hohen Motormomenten
  - Statt zusätzliche Zwischenwelle

# Lenkfunktionen der elektromechanischen Lenkung (EPS)

Grund-Lenkfunktionen (LF)	Erweiterte Lenkfunktionen (eLF)	Funktionen auf Fahrzeugebene
Servounterstützung	Aktiver Rücklauf	Parklenkassistent
Reibungskompensation	Geradeauslaufkorrektur	Fahrstreifenführung (Lane-Keeping-System)
Trägheitskompensation		Fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung
Dämpfung		

→ Im Verbund mit weiteren Fahrzeugsystemen (z.B. Sensorik zur Parklückenvermessung)

## EPS-LF / Funktionen auf Fahrzeugebene / Parklenkassistent

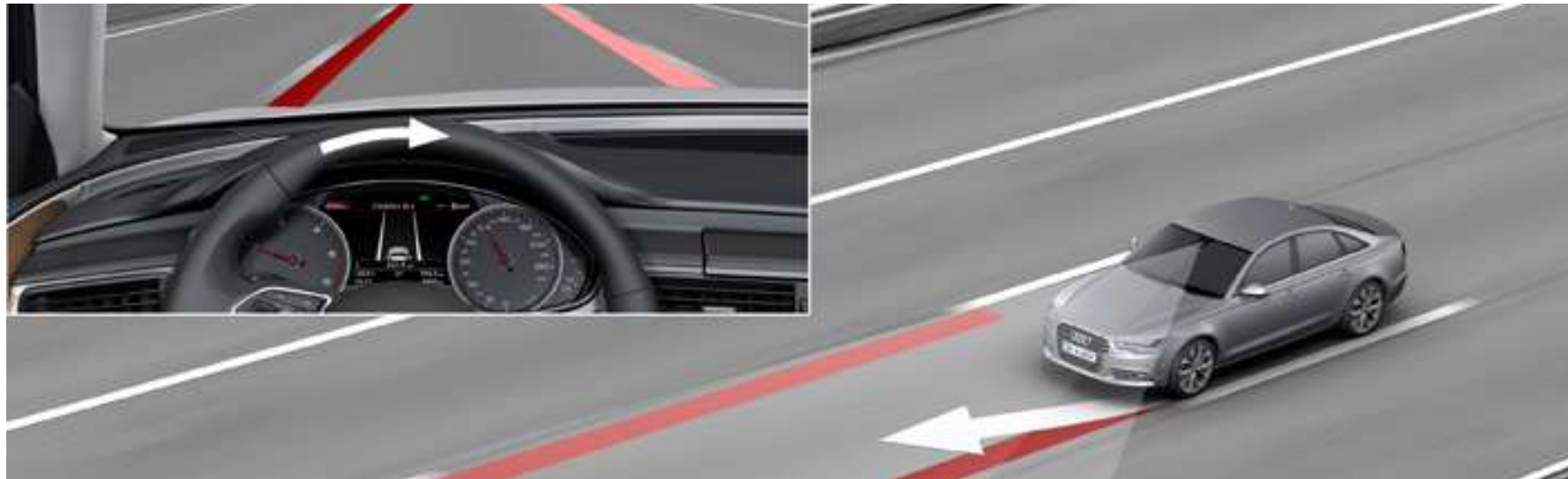


- Paralleles Einparken
- Fahrzeugelektronik gibt Lenkbewegungen vor, Fahrer regelt Gas und Bremse
- Umgebungssensorik (z.B. Ultraschallsensoren) notwendig
- Vorgabe der Lenkbewegung wird mit EPS umgesetzt

平行停车

Bild: Volkswagen Technik-Lexikon

# EPS-Funktionen auf Fahrzeugebene / LKS (Lane-Keeping-Support)



- Weiterentwicklung der Funktion Fahrerwarnung
- LKS soll das Fahrzeug durch aktive Lenkunterstützung auf dem Fahrstreifen halten
- Gesetzliche Rahmenbedingung: Fahrer darf nur unterstützt werden, wenn er auch tatsächlich das Lenkrad führt

- 进一步开发驾驶员警告功能

- LKS 应通过主动转向辅助功能将车辆保持在车道内

- 法律框架条件：驾驶员只有在实际控制方向盘的情况下才能获得辅助功能



# EPS-Funktionen auf Fahrzeugebene / Fahrdynamische Lenkmomentenempfehlung



- Durch Lenkradmomente soll der Fahrer zu gezielten Lenkbewegungen motiviert werden (z.B. zur Übersteuer-/Untersteuerkompensation)
- Beim Bremsen auf  $\mu$ -Split kann durch einen kurzen Momentenimpuls zum frühzeitigen Gegenlenken animiert werden
- Momentenimpulse müssen jedoch, ebenso wie die aktive Fahrstreifenführung jederzeit überlenkt werden können

Bild: auto-motor-und-sport.de, 2013

- 方向盘扭矩的目的是促使驾驶员做出特定的转向动作（例如，进行转向过度/转向不足补偿）

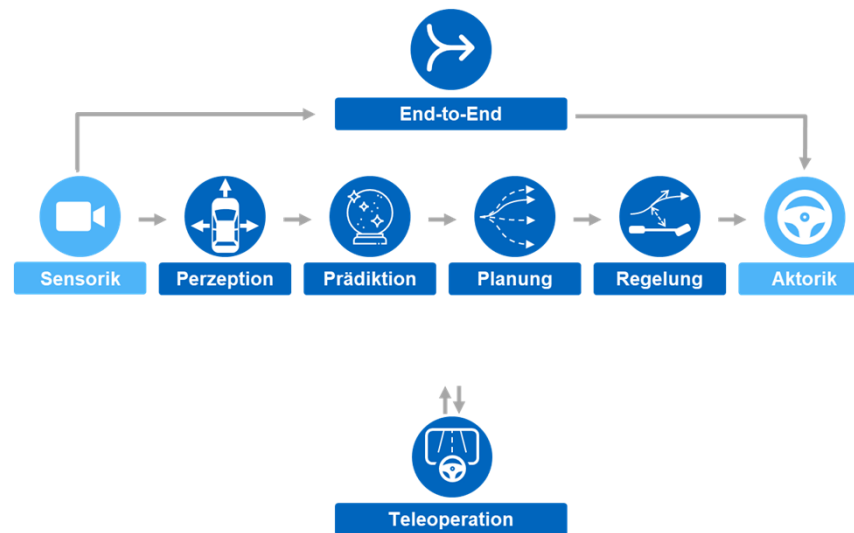
6 Funktionale Systemarchitektur und Aktorik → 6.3 Aktorik

- 当制动至 5 分割时，可使用短扭矩脉冲来鼓励提前反转向

- 不过，必须能够随时过度转向，就像主动车道引导一样

# Zusammenfassung der Leitfragen

- Aus welchen Bausteinen besteht die funktionale Systemarchitektur automatisierter Fahrfunktionen – und wie unterscheiden sich deren einzelne Bestandteile?



# Zusammenfassung der Leitfragen

- Wie lässt sich die Aufgabe der Planung unterteilen und welche Ansätze gibt es hierfür?
  - Situationsinterpretation
  - Verhaltensgenerierung
  - Verhaltensentscheidung
  
- Wie funktionieren aktuelle und zukünftige Aktorik-Konzepte?
  - X-by-Wire, insb. Steer-by-Wire
  - Regenerative Bremssysteme
  - Elektromechanische Lenkung
  - EPS-Funktionen auf Fahrzeugebene

# Quellenverzeichnis

- Maurer, Markus. *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*. VDI-Verlag, Düsseldorf 2000.
- Matthaei, Richard; Maurer, Markus. *Autonomous driving – a top-down-approach*. In: Automatisierungstechnik, 2015, 63. Jg., Nr. 3, S. 155-167.
- Reichel, Michael. *Situationsanalyse für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation. TU Braunschweig. 2013.
- Ardelt, Michael; Peter Waldmann. *Hybrides Steuerungs- und Regelungskonzept für das hochautomatisierte Fahren auf Autobahnen*. In: Automatisierungstechnik – Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik, 2011, 59. Jg., Nr. 12, S. 738-750.
- Ziegler, Julius, et al. *Making Bertha drive—an autonomous journey on a historic route*. In: Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE 6.2 (2014): S. 8-20.

# Quellenverzeichnis

- J. Ziegler, et al. *Kartengestütztes automatisiertes Fahren auf der Berta-Benz-Route von Mannheim nach Pforzheim*. 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Walting, 2014
- Ruf, Miriam, et al. *Comparison of Local vs. Global Optimization for Trajectory Planning in Automated Driving*. 10. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Walting, 2015
- Damerow, Eggert *Predictive Risk Maps*. In: Intelligent Transportation Systems (ITSC), IEEE, 2014.
- Pfeiffer et.al.: *Pixels, Stixels, Objects*. In: Computer Vision in Vehicle Technology @ European Conference on Computer Vision, 2012
- Polmans, K.; Stracke, S: *Torque vectoring as redundant steering for automated driving or steer-by-wire*. 5. Internationales Münchner Fahrwerk-Symposium, München, 2014