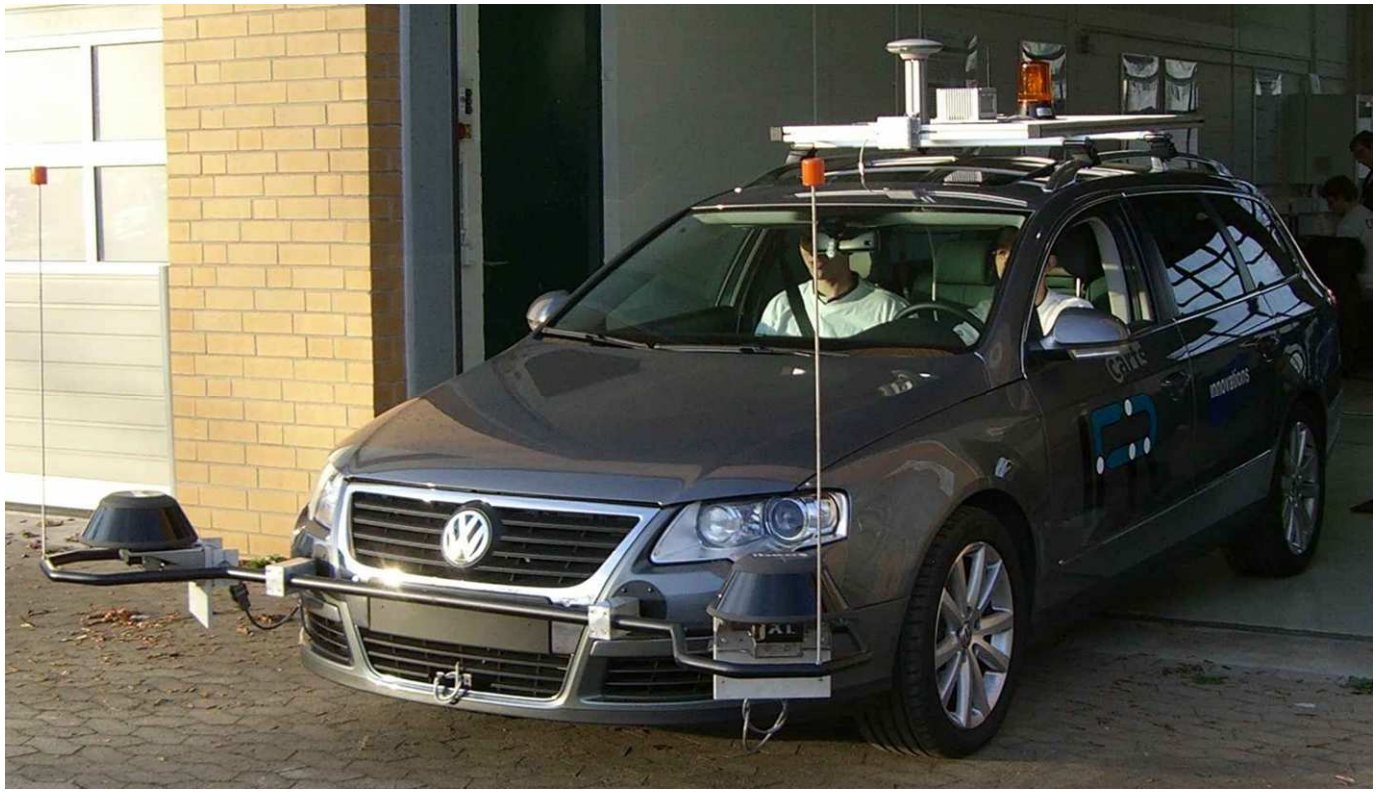
Caroline –
ein autonom fahrendes Fahrzeug im Stadtverkehr

Thomas Form
Christian Berger
Karsten Cornelsen
Michael Doering
Jan Effertz
Tim Gülke
Kai Homeier
Alexander Movshyn
Tobias Nothdurft
Michael Sachse
Jörn-Marten Wille



Caroline – ein autonom fahrendes Fahrzeug im Stadtverkehr

Inhalt

1. Aufgabe und Zeitplan
2. Anforderungen
3. Team
4. Projektstruktur und Aufbau “Caroline”
5. Tests und Simulation
6. Prozesse
7. Zusammenfassung

Urban Challenge 2007

Aufgabe und Zeitplan

- 60 Meilen städtischer Kurs in weniger als 6:00h:
  - *Beachtung von Verkehrsregeln*
  - *Interaktion mit dynamischen Objekten (fließendem Verkehr)*
  - *Überquerung von Kreuzungen*
  - *Beachtung von Hindernissen*
  - *kurzfristige Änderungen in der Ziel-/Missionsplanung*

- **Terminplanung:**

– 13. April 2007	Video-Demonstration
– 11. Juni - 20. Juli 2007	Vorausscheid Site Visit
– 10. August 2007	Halbfinale Verkündigung Teilnehmer
– 21. Oktober - 31. Oktober 2007	Halbfinale National Qualification Event
– 03. November 2007	Finale

Urban Challenge 2007

Anforderungen – sicheres autonomes Fahren im Verkehr mit 20mph

- Autonomes durchfahren komplexer Missionen mit max. 5min Vorbereitungszeit
- Selbsttätiges Navigieren in Gebieten ohne vorgegebene Wegpunkte
- Dynamische Anpassung der Route bei unvorhergesehenen Hindernissen mit ausführen von 180° Kehren bei blockierten Strassen
- Erkennen von gelben und weißen Fahrbahnmarkierungen
- Situationsabhängige Geschwindigkeitswahl und einhalten von vorgegebenen Geschwindigkeitsbeschränkungen mit max. 30mph
- Richtiges Erkennen und einhalten der Fahrspur auf befestigten und unbefestigten Strassen auch in Gebieten ohne bzw. mit eingeschränkter GPS Unterstützung
- Einhalten vorgegebener Sicherheitsabstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen bzw. in Stop-and-go Situationen
- Umfahren stehender Fahrzeuge und sicheres ein- und ausparken
- Spurwechsel beim Überholen ohne Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer und richtiges Verhalten vor Kreuzungen
- beachten von Vorfahrtregeln an Kreuzungen ohne unnötige Verweilen >10s.

Urban Challenge 2007

nicht geforderte Fähigkeiten

- Erkennen von Verkehrzeichen und Lichtsignalen durch die Sensorik des Fahrzeugs.
- Erkennen und ausweichen von Fußgängern.
- Geschwindigkeiten >30mph.
- Unbefestigte Wege, die ein geländegängiges Fahrzeug erfordern.

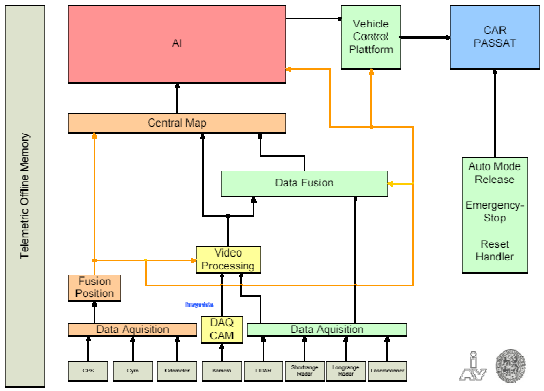
Urban Challenge 2007

Das Team

Institut für
Software Systems Engineering

Institut für
Regelungstechnik

Institut für
Computergrafik



IAV GmbH

Institut für
Flugführung

Institut für
Betriebssysteme u. Rechnerverbund

aktive Teammitglieder:

1 Anwalt (offiz. Teamleader und US-Bürger)

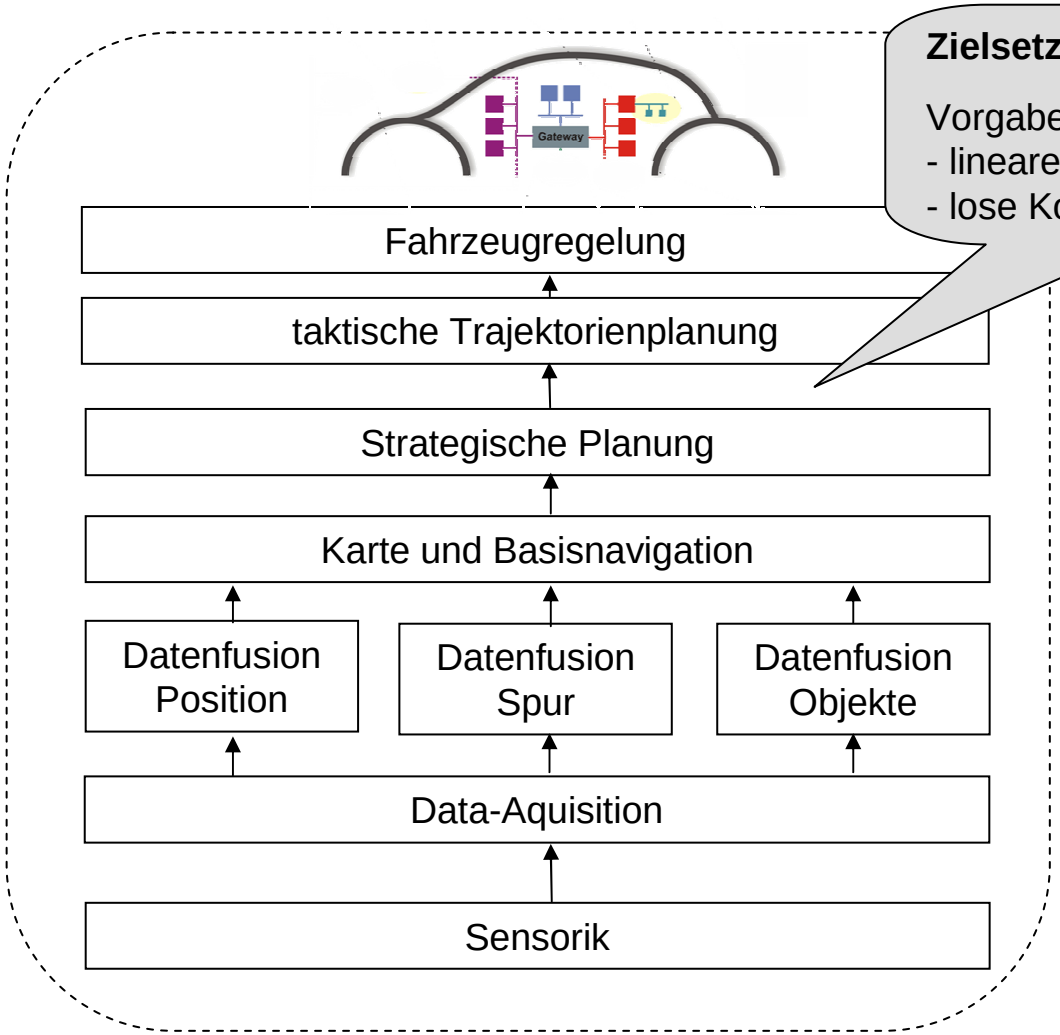
6 Professoren (Projektleitung Prof. Rumpe)

11 Ingenieure bzw. Informatiker

ca. 20 Studenten aus Informatik, Elektrotechnik und Maschinenbau

Projektstruktur und Aufbau “Caroline”

Strukturierung der Aufgaben



Zielsetzung robustes System

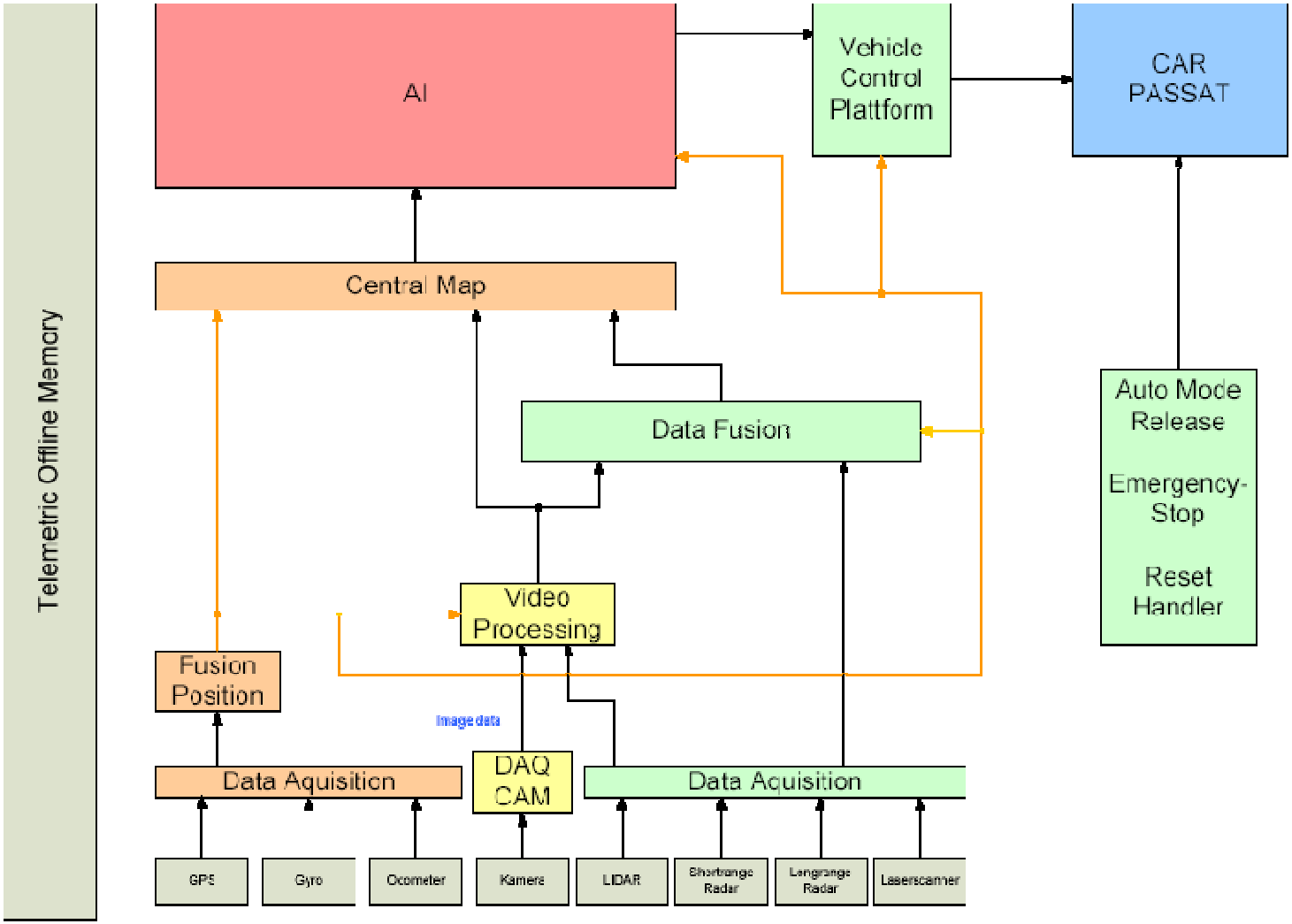
Vorgabe an Architektur :
- lineare einfache Struktur
- lose Kopplung der Module

Unterstützungsprozesse:

- SW-Entwicklungsprozess
- API
- Testen
- Simulation
- Fahrzeugum und -einbauten
- Informationsmanagement
- Multimedia
- Geschäftsstelle

Projektstruktur und Aufbau “Caroline”

Feinstruktur

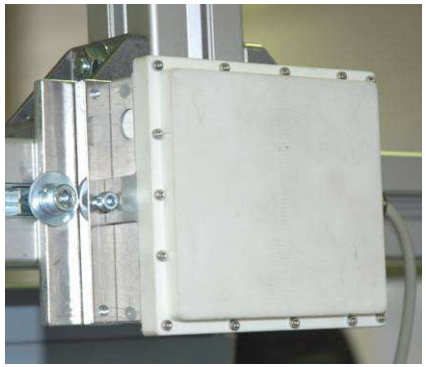


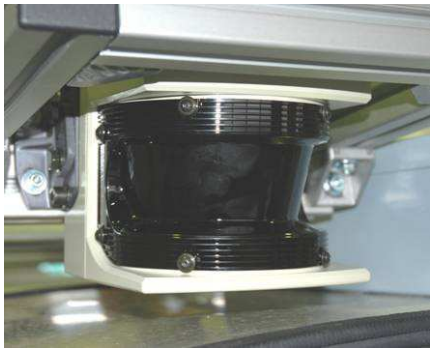
Fahrzeugumfelderkennung und Sensorfusion

„Wer die Wahl hat, hat die Qual“

Verschiedenste Sensortypen am Markt:

- **Radar**
- **Laserscanner**
- **Lidar**
- **Standard-Vision**
- **IR-Vision**
- **Stereo-Vision**
- **Ultraschall**





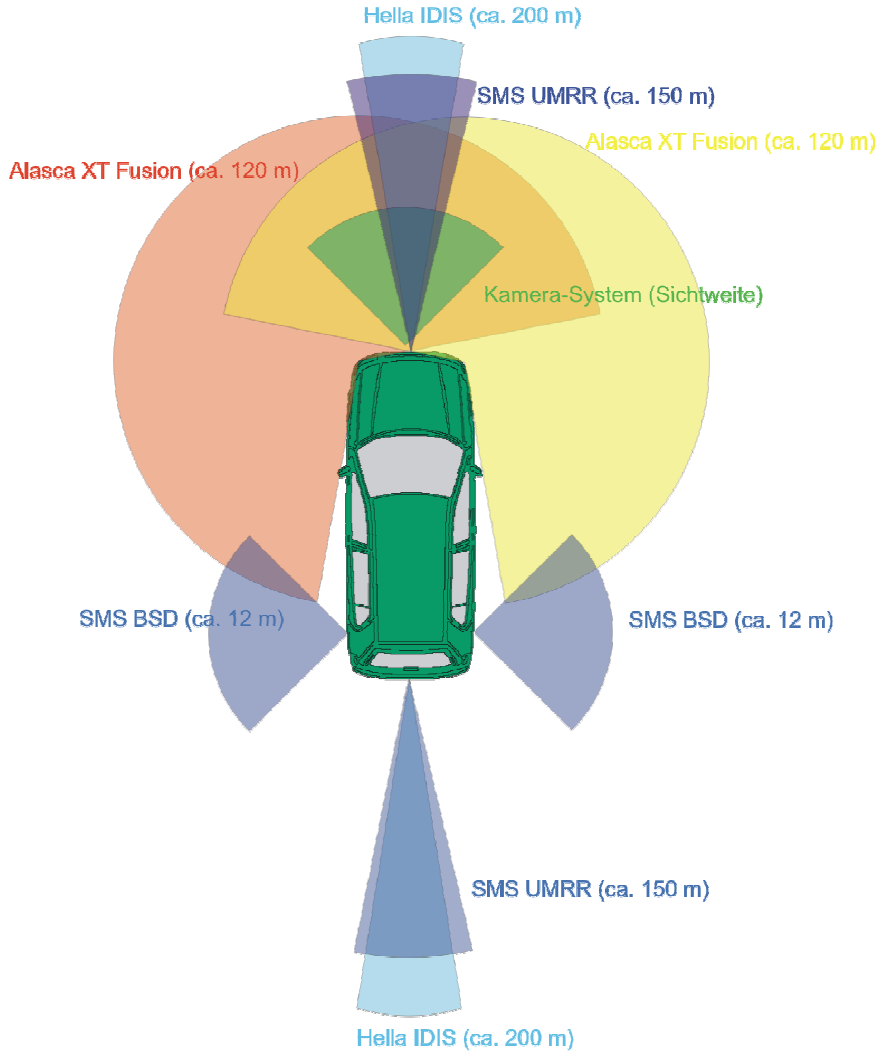
- **Jedes Messverfahren hat Stärken und Schwächen**
- **Es existiert zur Zeit kein „All-Round“-Sensor**

Fahrzeugumfelderkennung und Sensorfusion

„Viele Augen sehen mehr“

Lösung: Multi-Sensor-Netzwerke

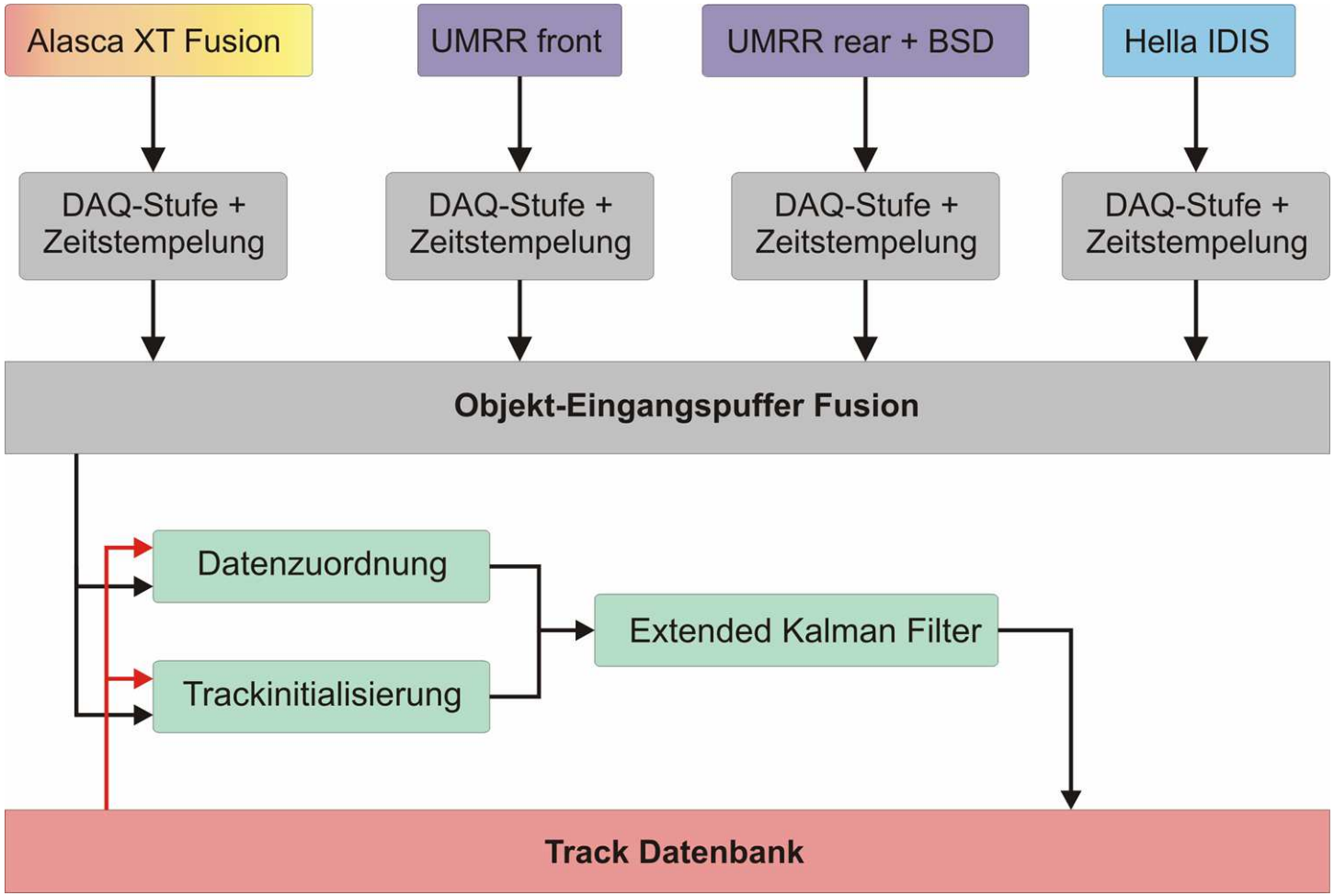
- **Überlappende Beobachtungsbereiche**
- **Stärken und Schwächen kompensieren sich**
- **Redundanz (Sicherheitsaspekt)**



Voraussetzung: Fusion der Sensordaten

Fahrzeugumfelderkennung und Sensorfusion

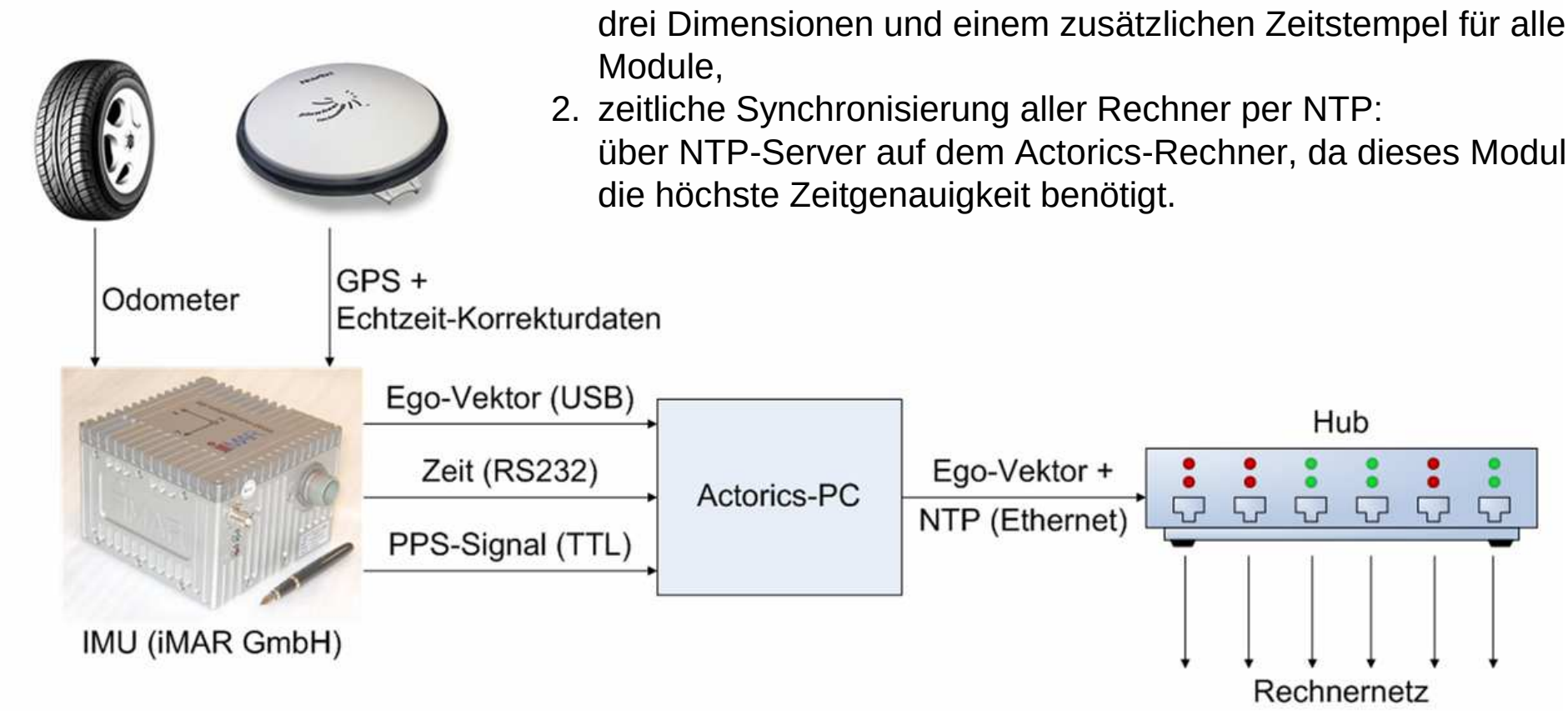
Konzept Tracking und Sensorfusion



Sensorik

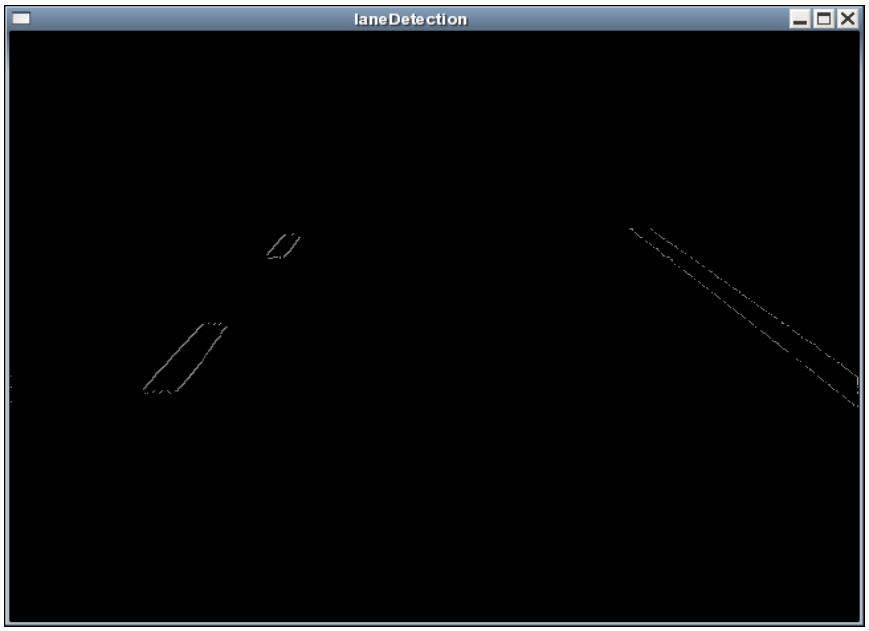
Inertial Measuring Unit

1. Distribution des Fahrzeug Ego-Vektors: Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Lagewinkel und Drehraten jeweils für alle drei Dimensionen und einem zusätzlichen Zeitstempel für alle Module,
2. zeitliche Synchronisierung aller Rechner per NTP: über NTP-Server auf dem Actorics-Rechner, da dieses Modul die höchste Zeitgenauigkeit benötigt.

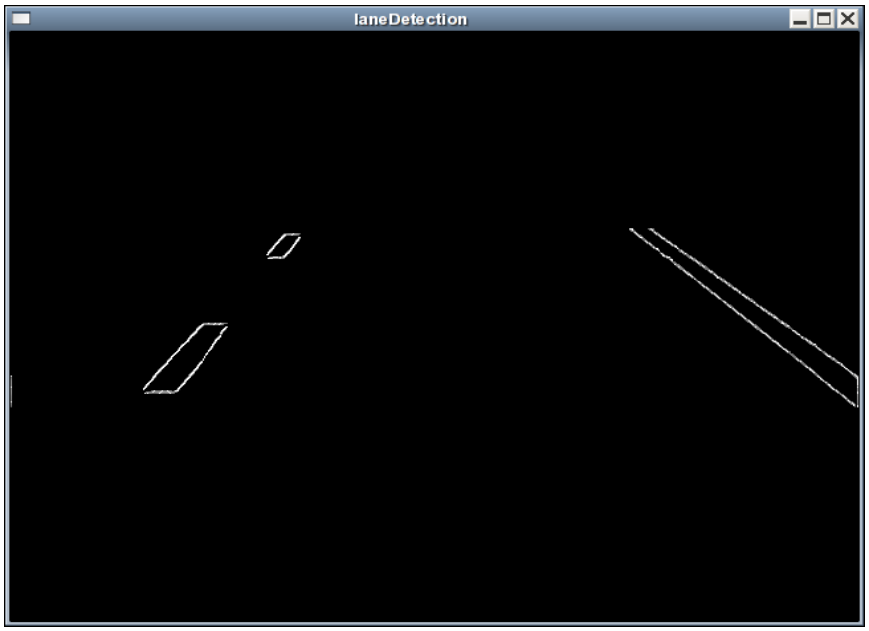


Spurerkennung – Initialisierung (1)

- Kantendetektion mit Hilfe des Canny-Filters



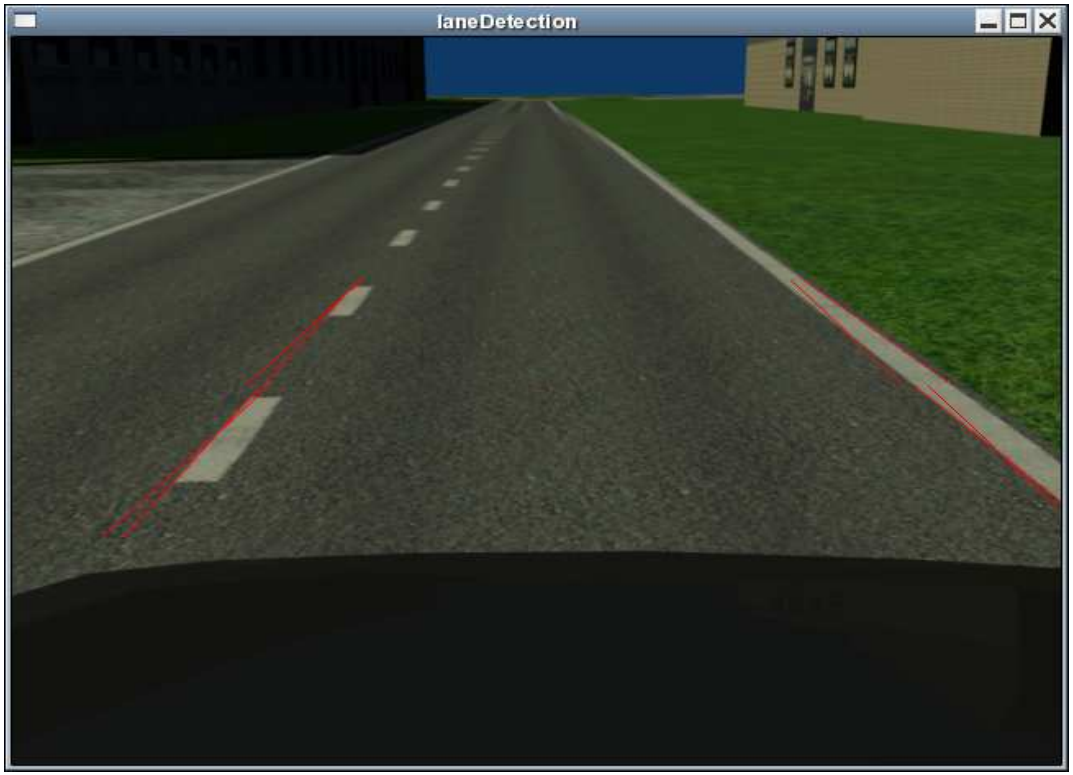
Sobel Gradient map



Canny-Edge result

Spurerkennung – Initialisierung (2)

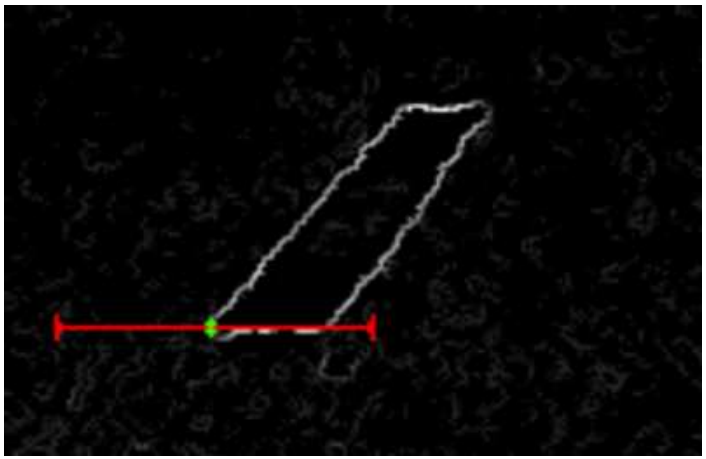
Hough-Transformation für die Liniendetektion



- Mit dem Einsatz der graphischen Hardware (GPU) dauert die Initialisierung nur etwa 0.1s:
  - Bildglättung und Canny-Edge 0.03 s
  - Hough Transformation 0.07s

Spurerkennung - Tracking

- Auf der Basis der aus der Initialisierung bekannten Richtungen der Fahrbahnmarkierungen wird ein Suchbereich entlang der x-Achse bestimmt.
- Die größten Gradienten in diesem Bereich liefern die gesuchten Fahrbahnmarkierungen.



Strategische Planung

Beispielszenario

Naive Ideen:

Direkt auf den Wegpunkt zufahren

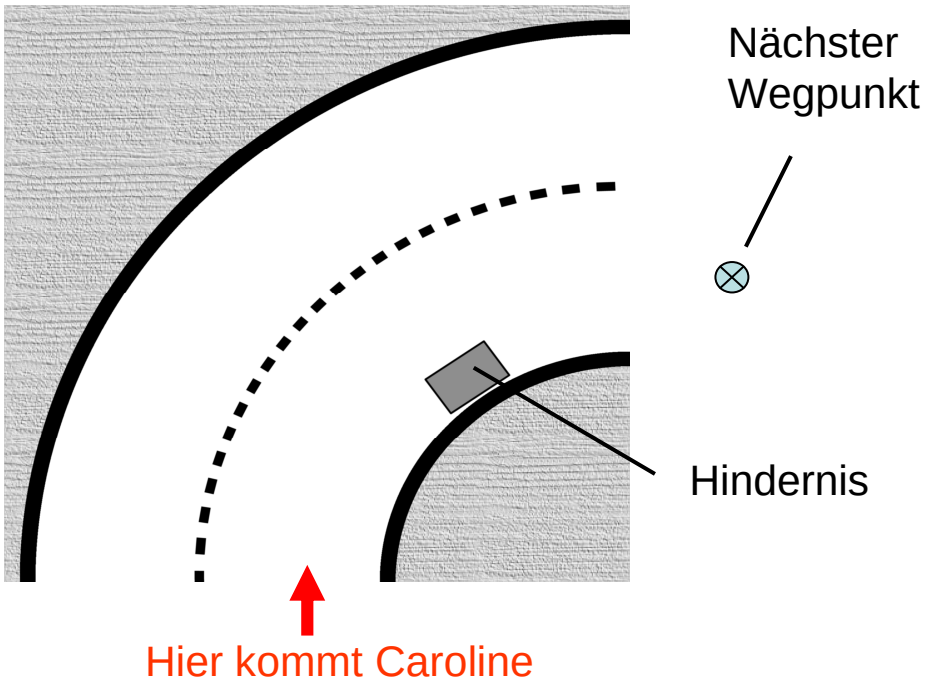
➡ Unfall mit Haus oder parkendem Auto

In der Mitte der Eigenen Spur bleiben

➡ Unfall mit statischem Hindernis

Gleicher Abstand zu allen Hindernissen

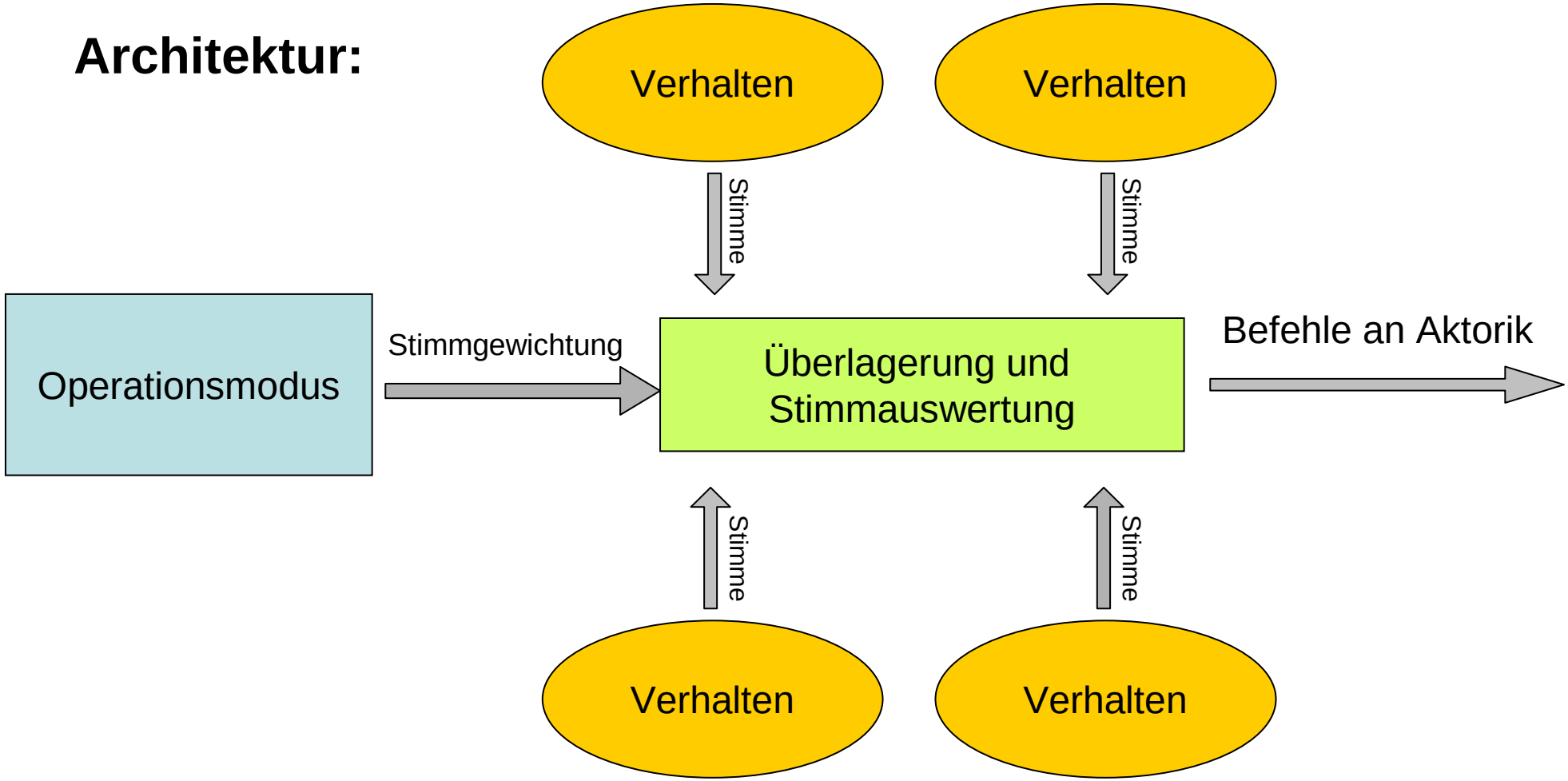
➡ Fahren auf dem Mittelstreifen



Nur das Beachten der Vorgaben aller Verhalten führt zum gewünschten Ziel.

Strategische Planung

Architektur:



Vorteile des Verhaltensansatzes

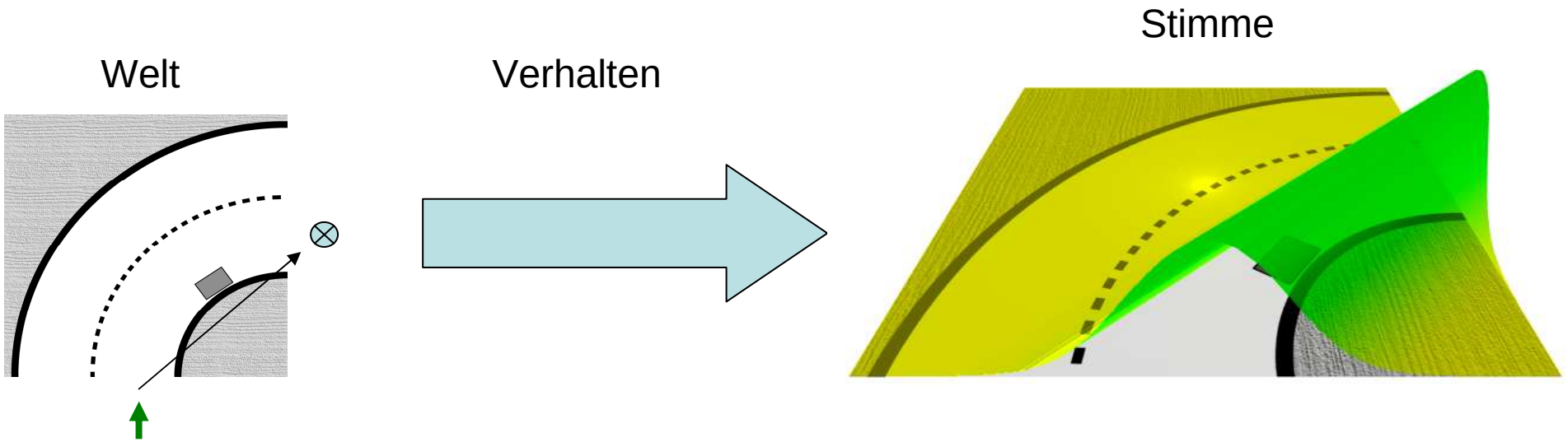
- Sehr gut inkrementell erweiterbar
- Problemstellung wird in Teilprobleme zerlegt
- Verschiedene Granularitäten von Verhalten möglich

Problem: Wie arbeiten die Verhalten zusammen?

- Jedes Verhalten bewertet die möglichen Werte der Stellgröße (z.B. Lenkradstellung)
- Die Stimmen werden gewichtet und überlagert
- Gewichtung anhand von Operationsmodi wie etwa „Straßenverkehr“, „offene Zone“ oder „Stoppschild, Schlange stehen“

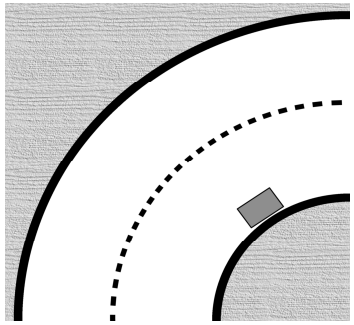
Strategische Planung

1. Den nächsten Wegpunkt anfahren



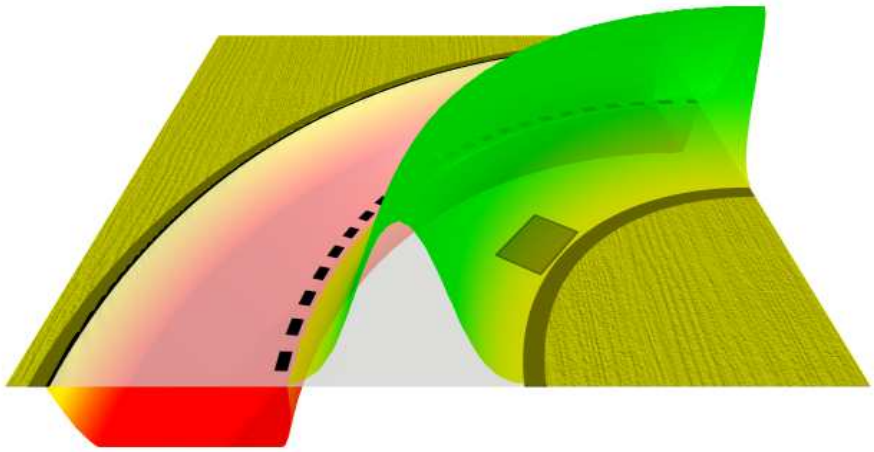
2. Der Fahrspur Folgen

Welt



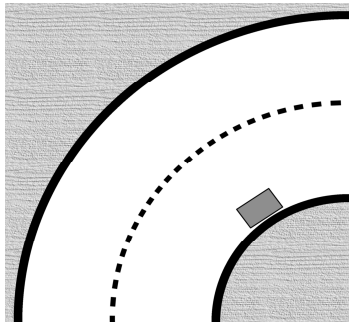
Verhalten

Stimme



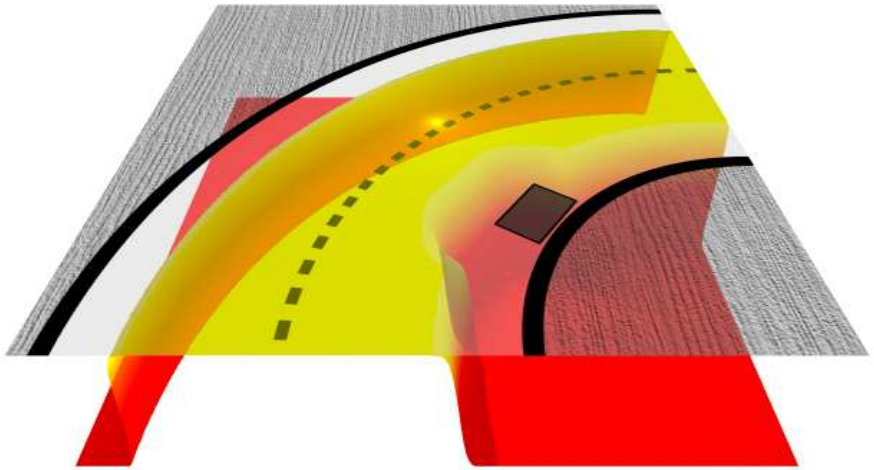
3. Hindernisse meiden

Welt



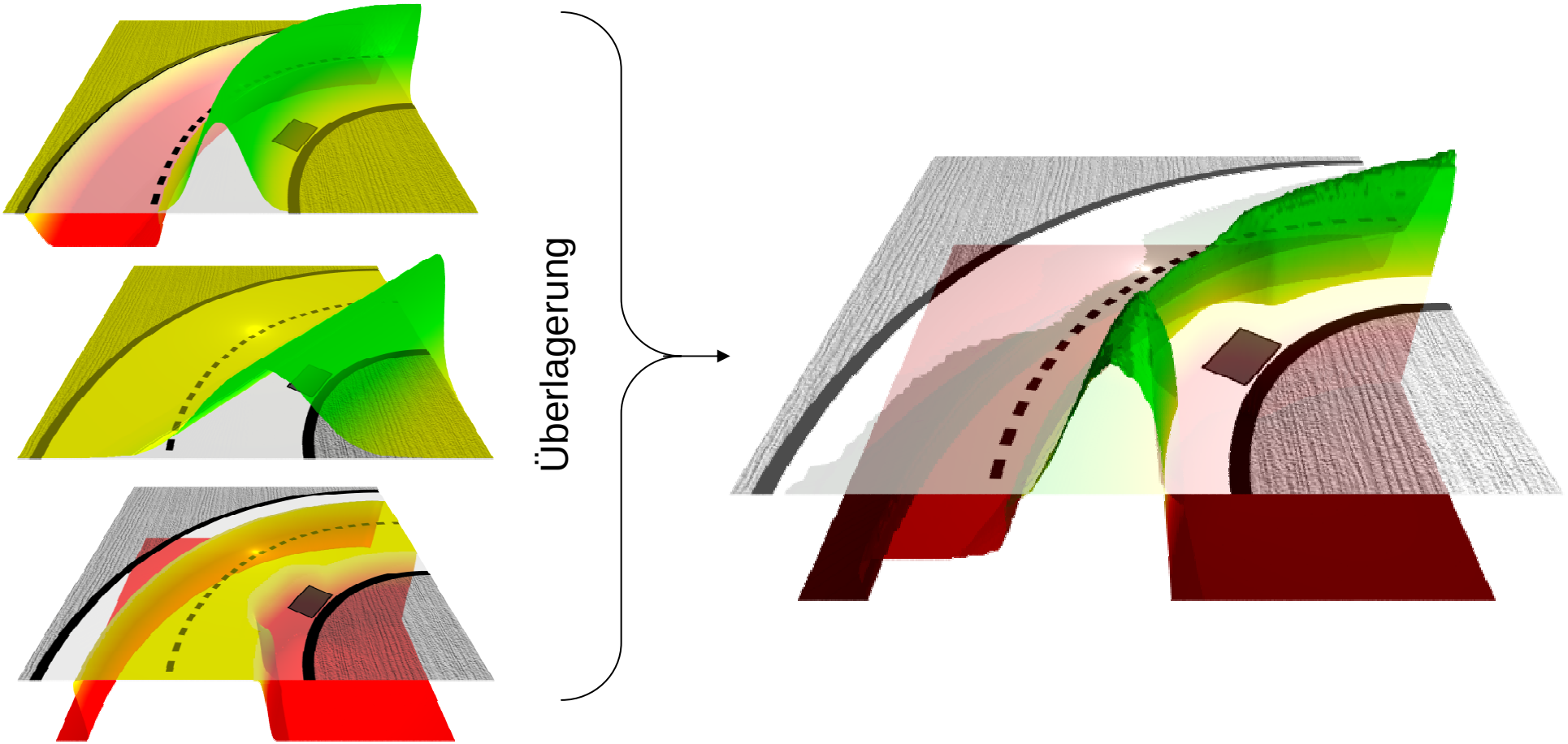
Verhalten

Stimme



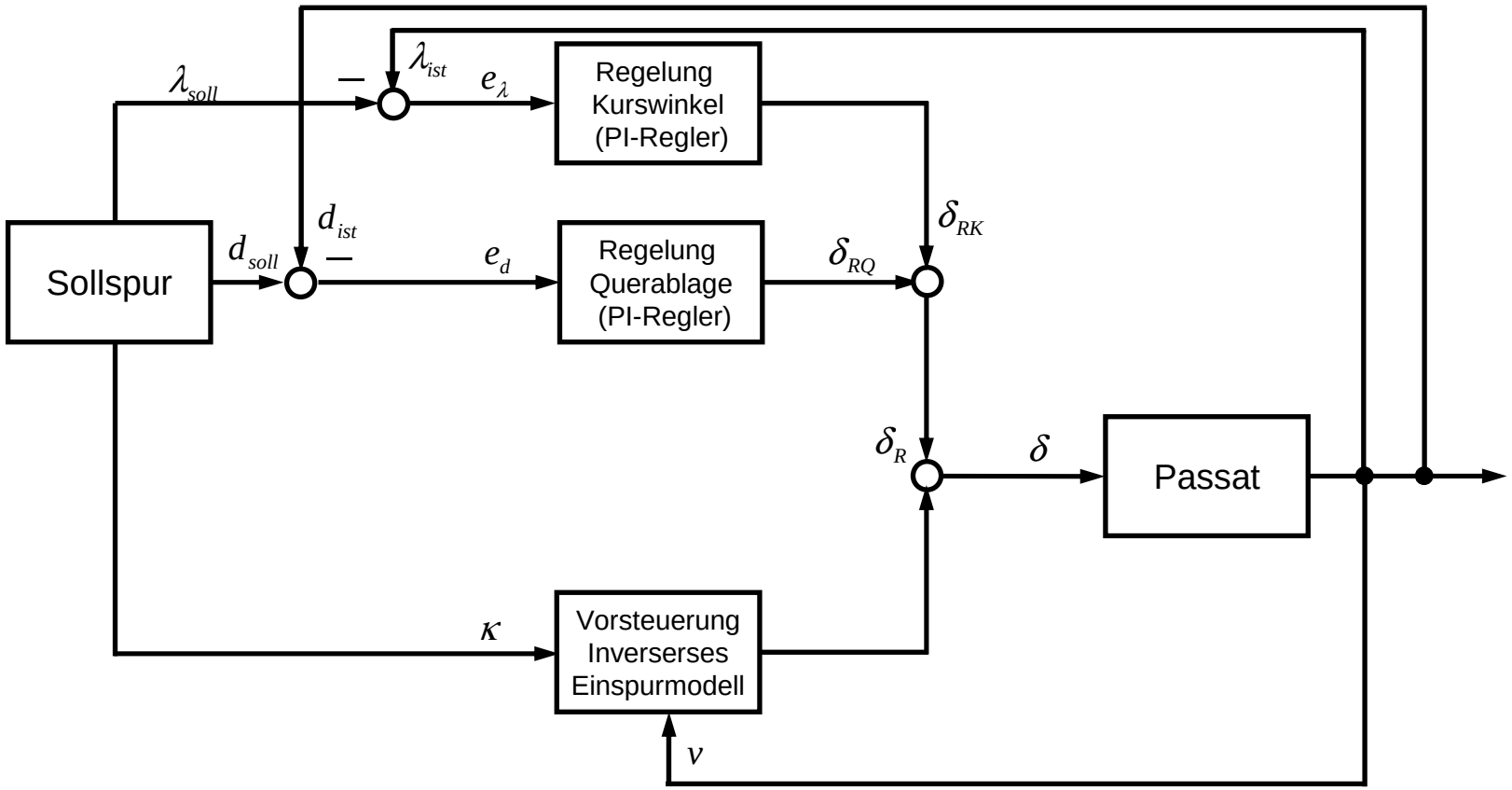
Strategische Planung

Ergebnis der Abstimmung



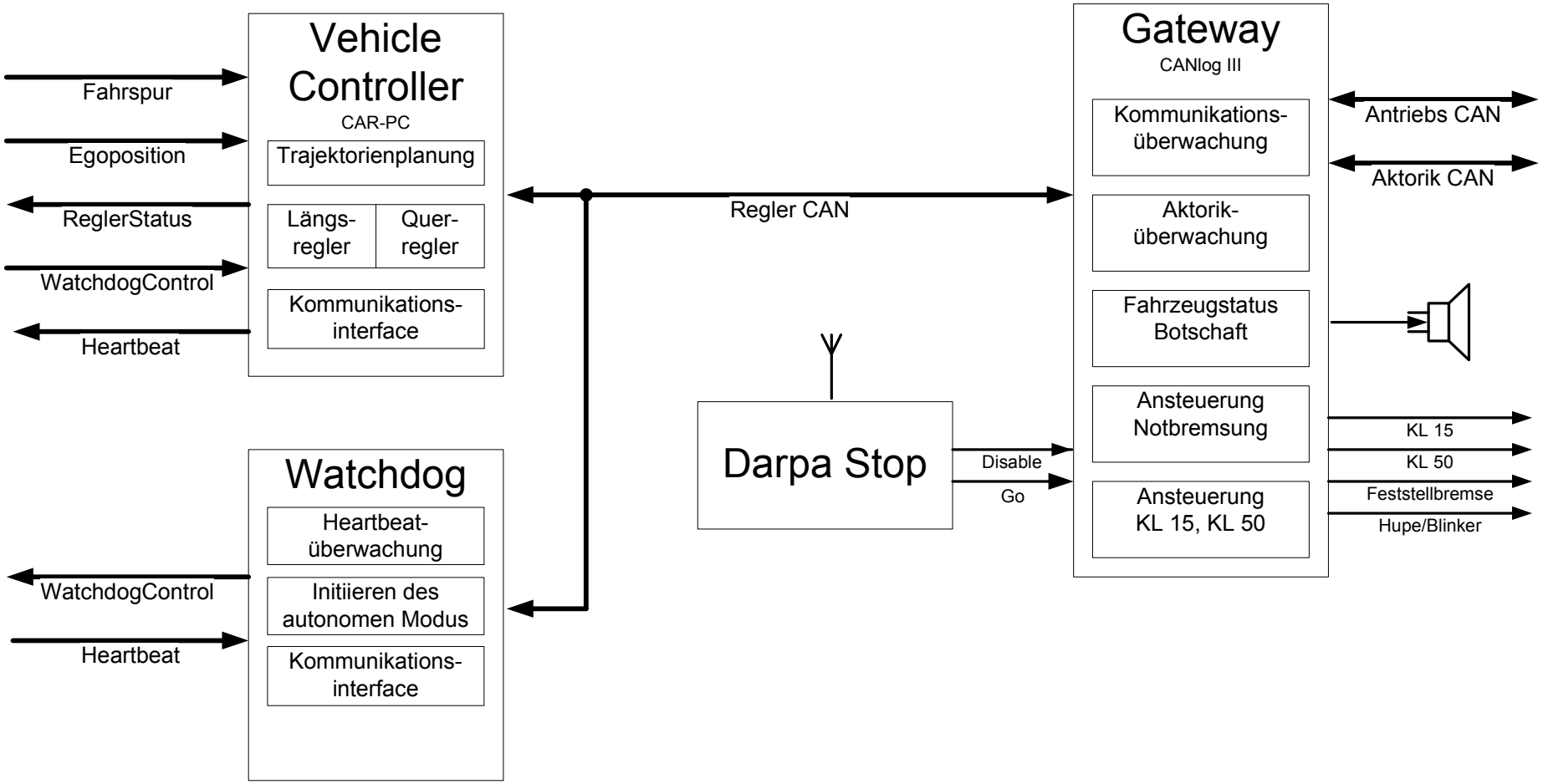
Regelung mit Vorsteuerung

Getrennte Regelung von Kurswinkel und Querablage



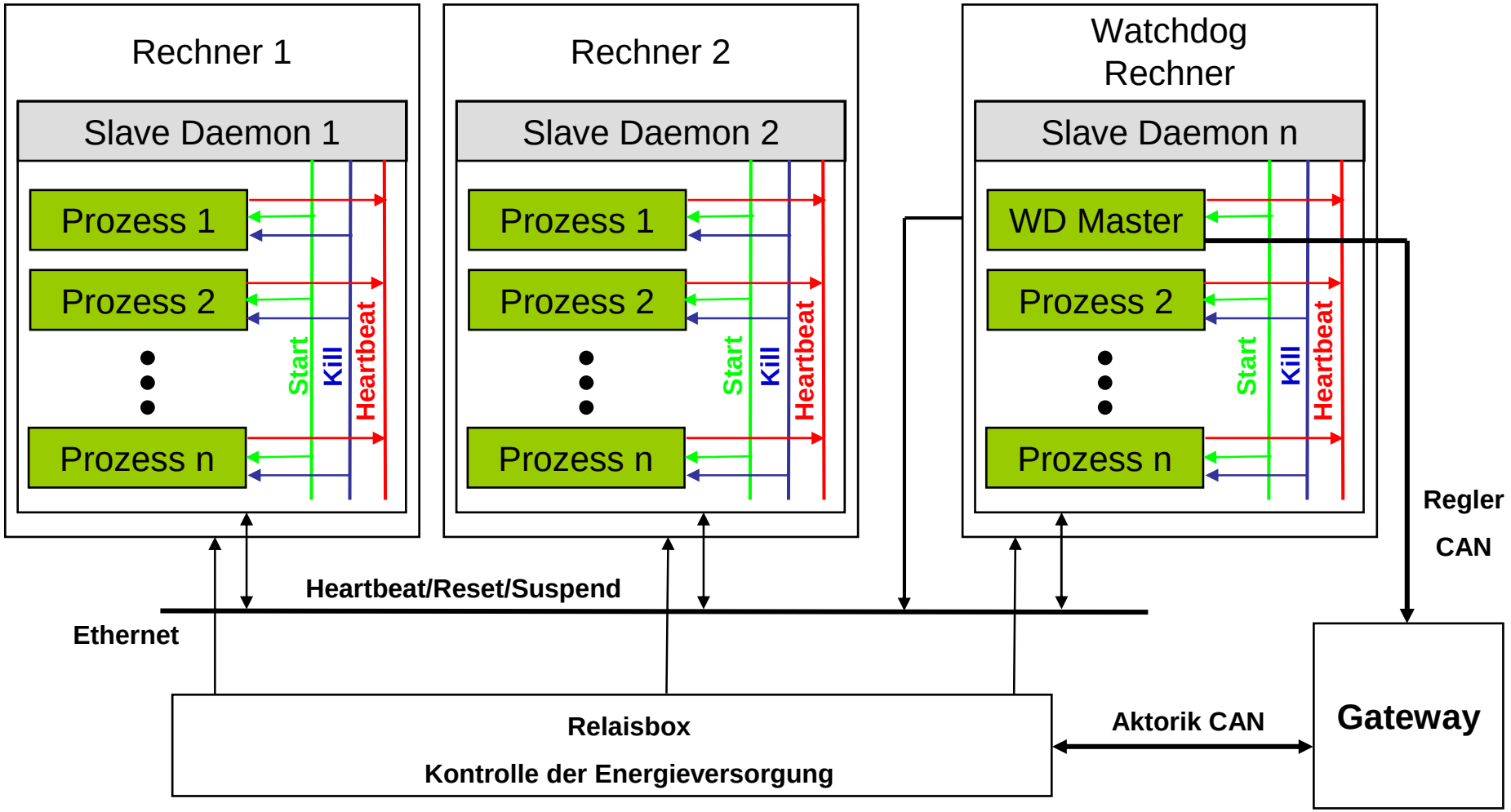
Sicherheitskonzept

Einbindung des Watchdog



Sicherheitskonzept

Heartbeatüberwachung



Rechnerarchitektur

Anforderungen

- Hardware
  - Robust gegen Hitze, Vibrationen, EMI
  - Hohe Energieeffizienz
  - Kompakte Bauformen
- Dediziertes Echtzeitnetzwerk
  - Garantierbare Untergrenze Bandbreite
  - Garantierbare Obergrenze Antwortzeit
  - Deterministisches Verhalten
- Betriebssystem
  - Verteiltes Echtzeitsystem mit gemeinsamer Uhr (Synchronität)
  - Treiberunterstützung für CAN, Kameras, GPU, IMU, …
  - Breite Softwarebasis, Nutzung vorhandener Open Source Komponenten (z.B. NTPD, GPSD, Postgres, …)

Rechnerarchitektur

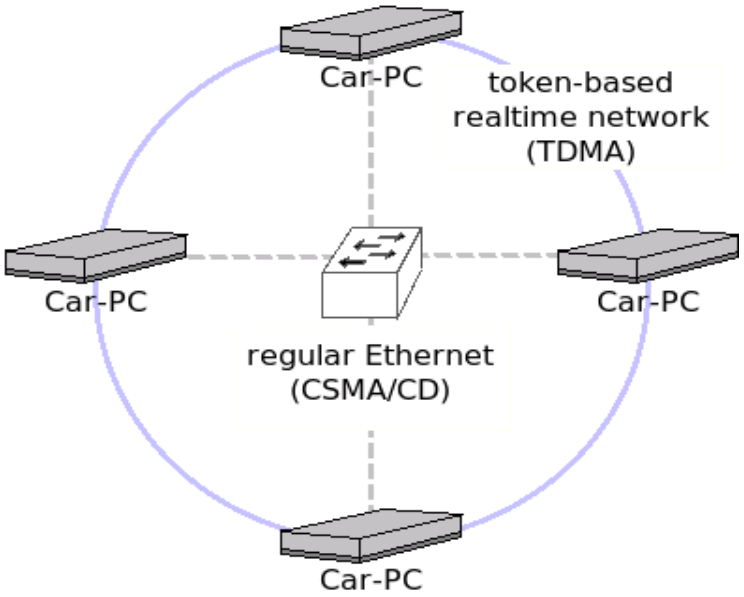
Rechner im Fahrzeug

- 5x Pentium M 2,1 GHz (Bressner BT-6910)
  - Data Acquisition (2x)
  - Digitale Karte
  - Strategische Planung
  - Taktische Planung, Regler und Watchdog
- 3x Core 2 Duo 2,33 GHz (Netco OfficeCarPC)
  - Fahrspurerkennung und Bildverarbeitung
  - Kameras
  - Hochleistungs-GPU

Rechnerarchitektur

Netzwerkarchitektur

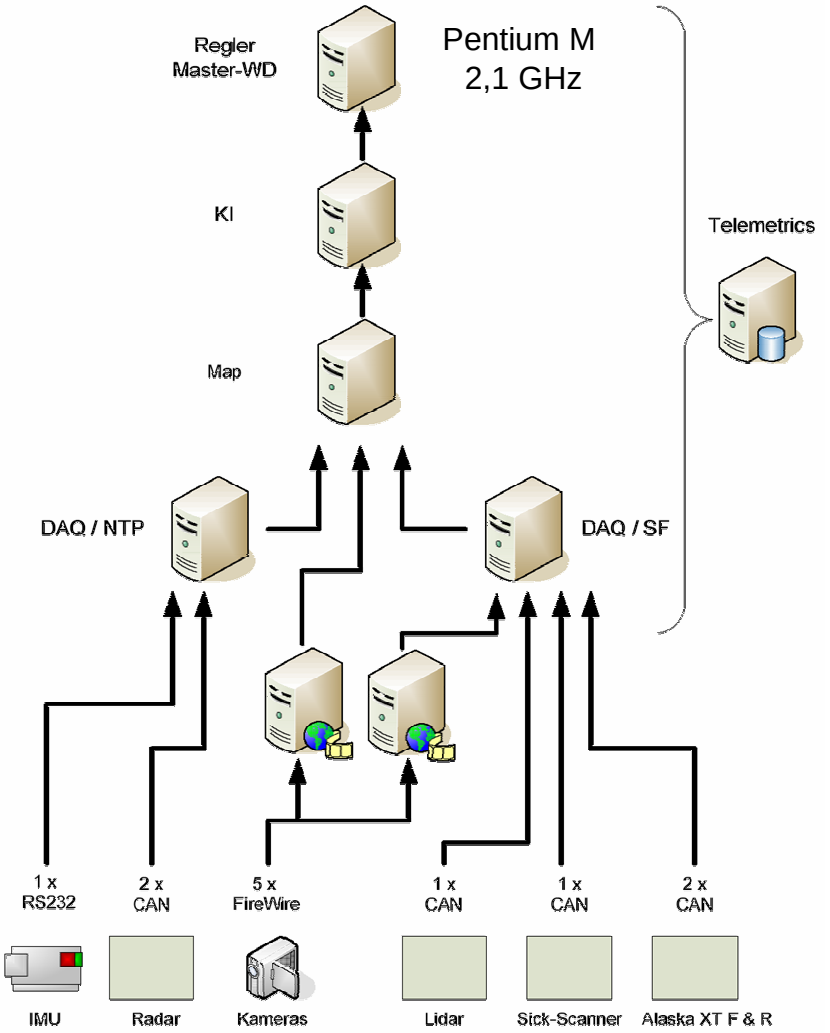
- Fast Ethernet für “normale” Kommunikation
- Dediziertes Echtzeitnetzwerk für Realtime-Messaging



tatsächliches Mapping

in

Caroline



Prozess zur Sicherstellung geforderter Fahrfunktionen

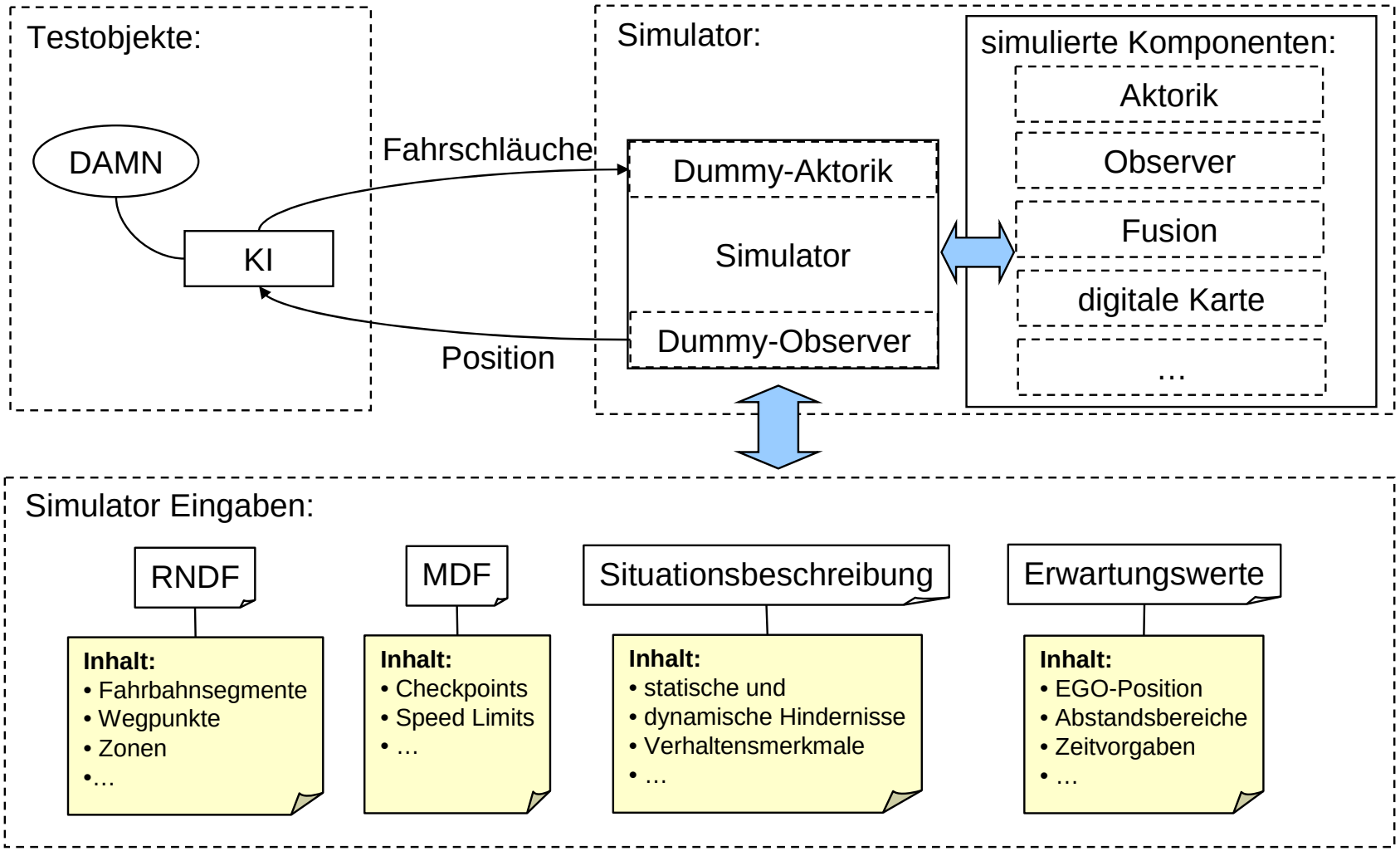
Testen und Simulation

- **virtuell**
  - automatisierte Testfälle durch den Einsatz eines Unit-Test-Frameworks
    - Aufbau einer Testinfrastruktur
    - benötigte Komponenten werden über Test-Fixtures instantiiert und miteinander verbunden
  - Testszenarien nach dem Blackbox-Verfahren
    - Vordefinierte Eingabewerte (RNDF, MDF, …)
    - Vergleich von IST- und SOLL-Verhalten
  - Aufbau eines Testfallkatalogs
    - Simulation von Standardszenarien
    - Ziel: möglichst viele Standardsituationen durch Testfälle abdecken
    - meilensteinorientierte Gewichtung nach Schwierigkeitsgrad

- **real**
  - Definition und Aufbau von Testszenarien

virtuelle Überprüfung durch Akzeptanztests

Testen und Simulation



reale Überprüfung durch Testszenarien

Testen und Simulation

Parking lot

Vehicle exhibits correct parking lot behavior and demonst spot.

Extraktion von Detailanforderungen aus den DARPA-Vorgaben

#	Short Description	Full Description
C.3.1	obstacle field	Das Fahrzeug erfüllt die Anforder
C.3.2	Erkennung eines Parkplatzes	Dies Software erkennt die im RND
C.3.3	K-Rails	die Parkplätze können durch http://en.wikipedia.org/w
C.3.4	vorwärts einparken	Das Fahrzeug fährt vorwärt
C.3.5	Waypoints	Das Fahrzeug muss beide P
C.3.6	rückwärts ausparken	Das Fahrzeug verlässt die P A.7

Erarbeitung von Testszenarien

Software Engineering Process

Umfeldanalyse des heterogenen Projektumfelds

- Projektmitglieder
  - mehrere Institute mit Professoren und Wissenschaftlichen Mitarbeitern
  - verschiedene Studiengänge
  - unterschiedliches Vorwissen
  - ungleiche Studiendauer
- Organisation
  - Abstimmung der Institute
  - Synchronisierung mit verschiedenen, institutsbezogenen Projekten
  - ggf. konkurrierende Studienziele
- Hardware
  - PC
- Software
  - Programmiersprachen C, C++, Matlab/Simulink
  - Betriebssysteme Microsoft Windows, Linux und Steuergeräte-OS
  - Entwicklungsumgebungen Eclipse

Software Engineering Process

Anforderungen

- Ziel: DIE SOFTWARE IST IMMER LAUFFÄHIG!
  - agiler Software Engineering Prozess
  - mit heterogenem Umfeld
  - aggregierte Berichterstellung und zentrale Bereitstellung
  - zeitnahe Bewertung der Software Qualität
  - Codierungsrichtlinien
  - Umsetzung des „test-first“-Vorgehens
  - automatisierte und unbeaufsichtigte Berichterstellung
  - Anbindung an Versionierung- und trac-System
  - sofortiges Entwickler-Feedback

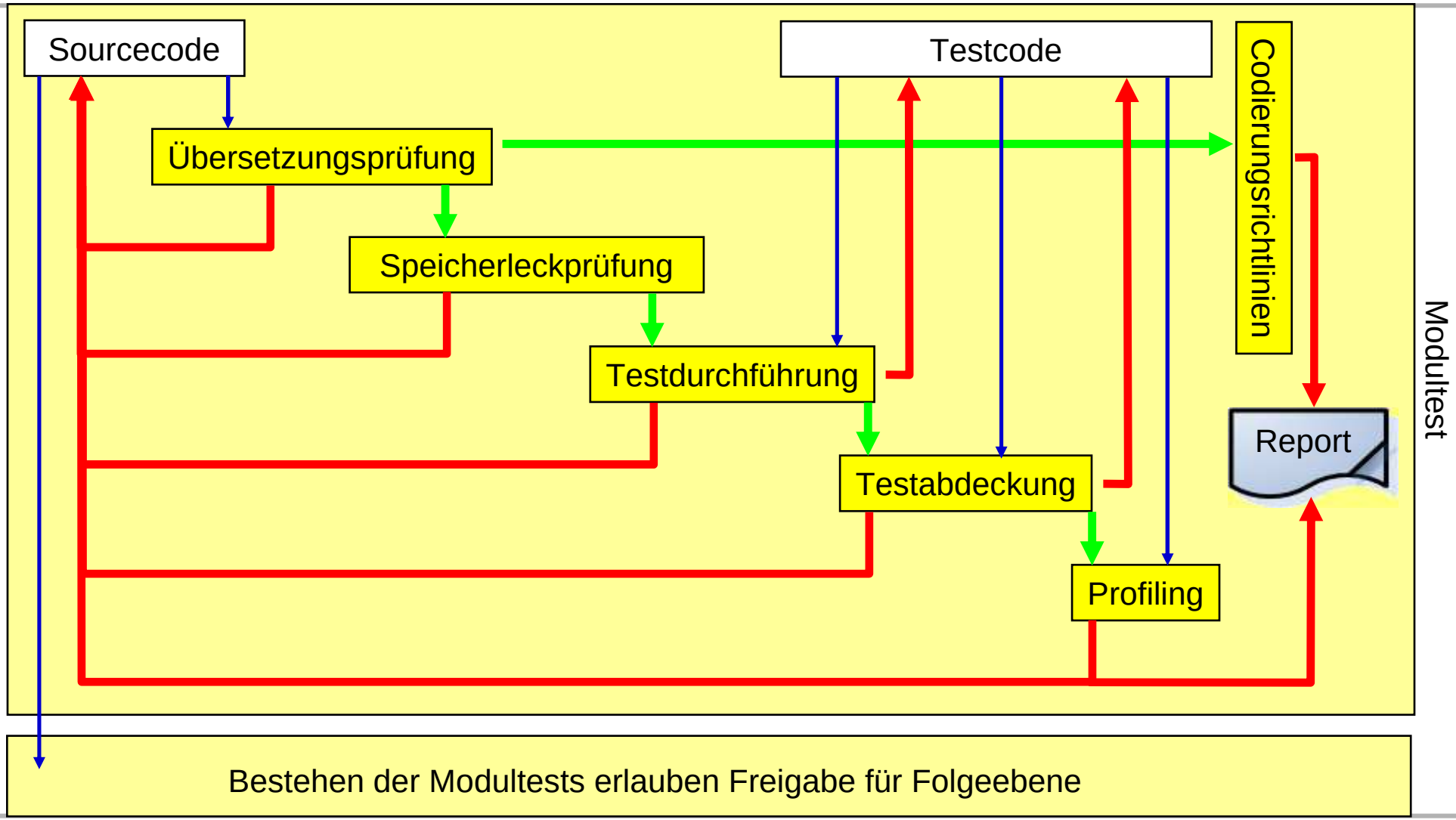
Software Engineering Process

Moderner Entwicklungsprozess

- Verzicht auf Varianten des Quellcodes!
  - konsistenter und durchgängiger Entwicklungsprozess
  - Paradigma: Ständig getesteter Quellcode zur fortwährenden Sicherstellung von
    - Übersetzbarkeit
    - Einhaltung von Schnittstellen
    - permanente Integration verteilter Programmmodule
    - Ausführbarkeit der übersetzten Programme
  - Ziel:
    - Vertrauen in eigenen und fremden Quellcode
    - Erleichterung und Unterstützung von Refactorings
    - zeitnahe Bewertung der Software-Qualität
    - Motivation der Entwickler

Software Engineering Process

Schematische Prozessdarstellung



Application Programming Interface

Überblick SW-Komponenten

- API stellt generische Methoden zur Verfügung und abstrahiert die reale Hardware und Systemprozesse
- Namensraum für die verschiedenen Module
  - actorics – kapselt alle Module zur direkten Kontrolle des Fahrzeugs
  - ai – kapselt alle Planungsalgorithmen
  - canobjects – zuständig für alle via CAN gesendeten Daten
  - cgobjectdetection – stellt Algorithmen für kameraunterstützte Objekterkennung zur Verfügung
  - data – beinhaltet alle Datenklassen für die Datenübertragung zwischen Modulen (Teil der API)
  - digitalmap – verwaltet und erweitet ggf. die digitale Karte
  - fusion – Sensordatenfusion
  - lanedetection – kapselt die kameragestützte Spurerkennung

    …..

actorics
ai
boost::spirit
canobjects
cgobjectdetection
controlelements
data
digitalmap
exceptions
fusion
lanedetection
observer
recorder
sensors
simulator
std
ui
utils
watchdog

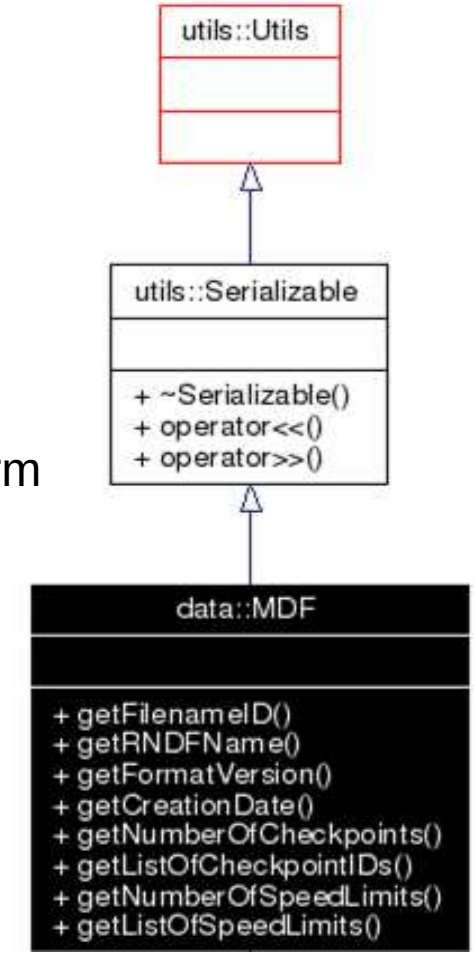
Application Programming Interface

Beispiel: Missions Daten Datei (MDFILE)

- enthält alle Datenklassen für zwischen Modulen ausgetauschten Objekten

- bietet generische Eigenschaften für alle Objekte
  - Serialization
  - Deserialization
  - Konvertierung und Darstellung des Inhalts in lesbarer Form

- Beispiel: MDF
  - repräsentiert richtig geparste Datei mit Missionsdaten
  - bietet ein Interface zum Einlesen der Daten
  - aus Klasse MDFFILE gebildet



Caroline – ein autonom fahrendes Fahrzeug im Stadtverkehr

Zusammenfassung und bisherige Erfahrungen

- robuste Rechnerhardware erforderlich mit hohen Anforderungen an Stabilität und Verfügbarkeit des Betriebssystems
- einheitliche Schnittstellen und eine saubere Architektur für alle Module erlauben einfache Wartbarkeit und Austauschbarkeit
- Projektarbeit mit großem interdisziplinärem Team verbunden mit einem engem zeitlichem Rahmen in einem universitären Umfeld stellt hohe Anforderungen an Teammitglieder, -prozesse und Werkzeuge