

Carl von Ossietzky
Universität
Oldenburg

BTC

*embedded
systems*

Abt. Foundations and Applications of Systems of Cyber-Physical Systems

Abt. Verteilte Regelung in Vernetzten Systemen

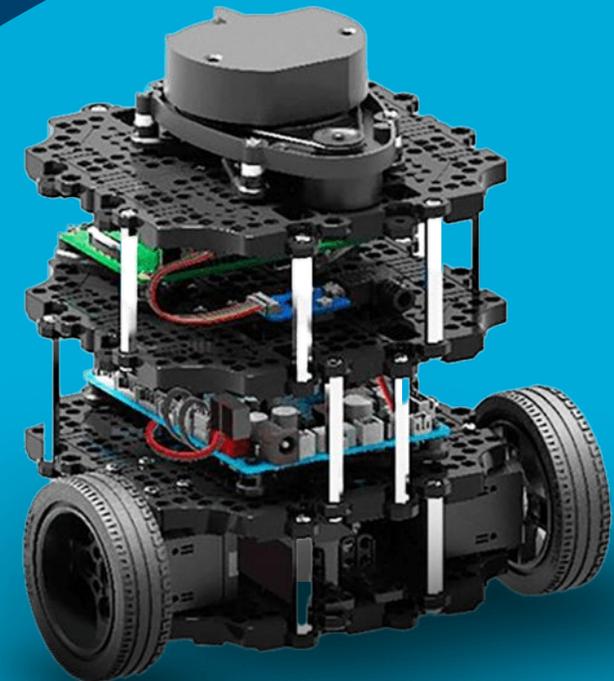


iTraffic with TurtleBots

Testbasierte Validierung Autonomer
Fahrfunktionen

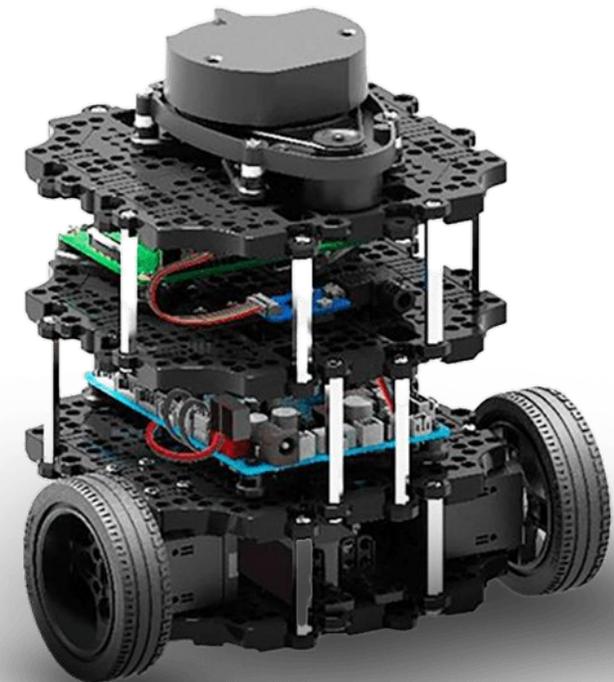
Carl Schneiders, Filip Wojciak, Jan-Magnus Monenschein,
Julia Debkowski, Lasse Heckelmann, Malte Grave,
Marie Marken, Nellson Eilers, Paulina Kowalska,
Stefan Gerber, Simon Struck

28.09.2023



Agenda

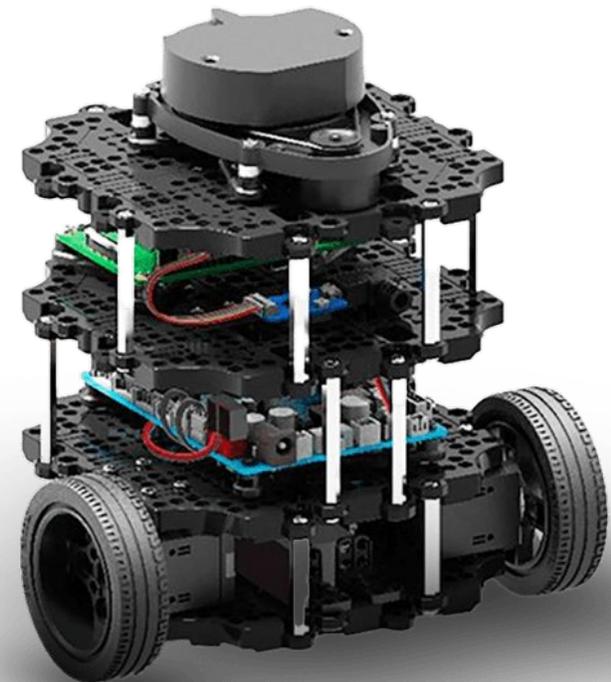
1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion



1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

Vision

Marie Marken



Projektziele

- Bewältigung der Herausforderungen autonomen Fahrens
- Simulation unterschiedlicher Autonomiestufen bei gleicher Hardware

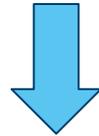
Keine Autonomie	Teilautomatisiert	Hochautomatisiert
manuelle Steuerung	Fahrfunktionen <ul style="list-style-type: none">● Tempomat● Spurhalteassistent● Abstandsregeltempomat● Spurwechselassistent● Hindernisumfahrung● Überholvorgang	Verkehrsschildererkenung <ul style="list-style-type: none">● Geschwindigkeitsbegrenzungen● Überholverbote Selbstinitiierte Ausführung der Funktionen

- Entwicklung sicherer und reaktiver Fahrstrategien in Hinblick auf “böartige” Verkehrsteilnehmer
- Experimentelle (simulative) Validierung von Fahrfunktionen in Verkehrsszenarien

Vision

Test-Plattform

- Aufbau einer Testplattform für autonome Fahrfunktionen auf Basis von TurtleBots
- Validierung: Methoden zur Definition von Testfällen und deren Ausführung



Experimentelle Validierung von Fahrfunktionen in Verkehrsszenarien unterschiedlicher Komplexität

Entwicklung von Fahrfunktionen

- Aufbau einer Entwicklungsplattform
- Regelungstechnisch-orientierte Umsetzung

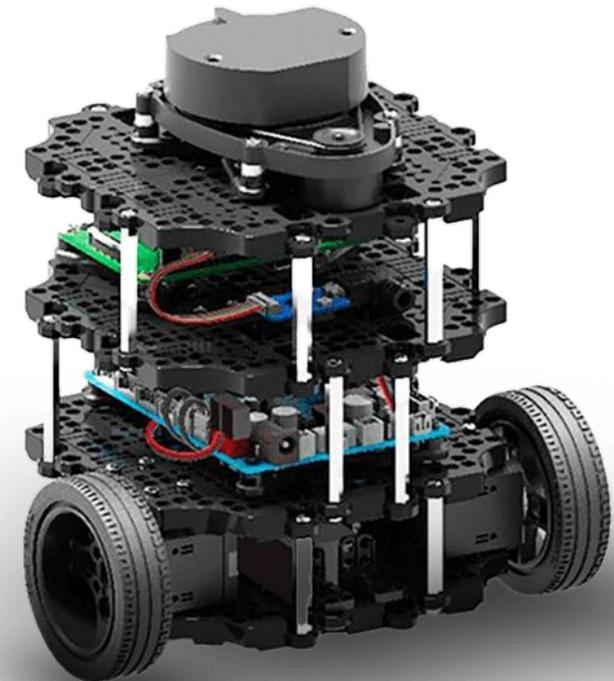


Bereitstellung der Fahrfunktionen zur Autonomisierung

1. Vision
2. **State of the Art**
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

State of the Art

Marie Marken



1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

Weitere Projektgruppen



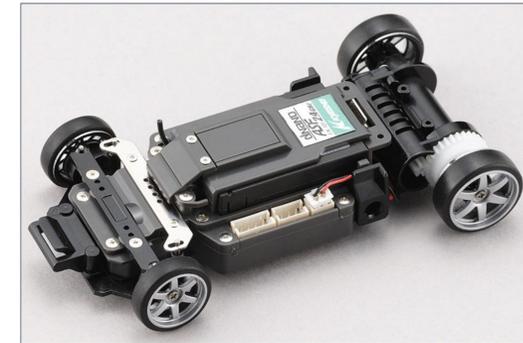
Umgebung:
Rennstrecke

Szenarien:
Unfallfreie Fahrt. Autonome
Befahrung einer Rennstrecke durch
ein Fahrzeug.

- Aufbau einer initialen Rennstrecke
- Entwicklung einer Fahrzeugerkennung
- Autonomen Längs- und Querführung für ein Fahrzeug

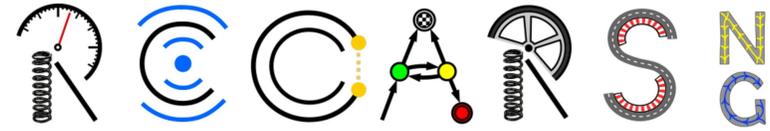


Rennstrecke *Mini-Z Grand Prix Circuit 30*, Marke *Kyosho*



RC-Car Marke *Kyosho*

Weitere Projektgruppen

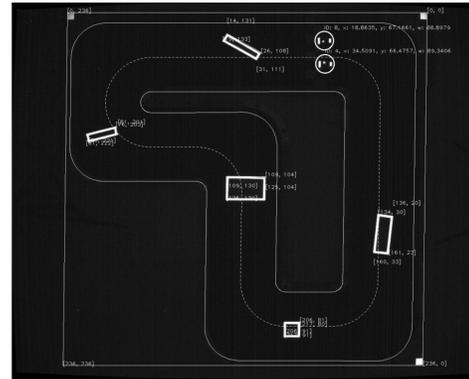


Realtime Controlled Cooperative Autonomous Racing System next generation

Umgebung: Rennstrecke

Szenarien:
Unfallfreier Überholvorgang.
Autonome Befahrung einer
Rennstrecke durch zwei
Fahrzeuge.

- Folgen anderer Fahrzeuge
- Überholvorgang
- Hindernis-Integration

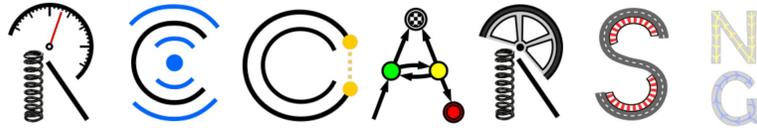


Infrarotaufnahme der
Rennstrecke mit
Hindernissen und
Fahrzeugen



RC-Car mit Markierung

Abgrenzung zu unserer Projektgruppe



Realtime Controlled Cooperative Autonomous Racing System next generation



- Globales Wissen und externe Berechnungen
- Vorhergehende Trajektorienberechnung
- Statische Hindernisse
- Matlab, C++
- Kamera
- Rennstrecke
- Lokales Wissen und lokale Berechnungen
- Dynamischer Überholvorgang
- Statische und dynamische Hindernisse
- Python
- Kamera, Lidar
- Autobahn

Weitere Projektgruppen

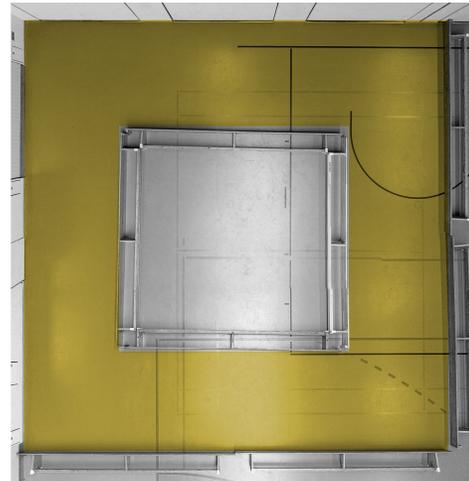


Umgebung: Parcours

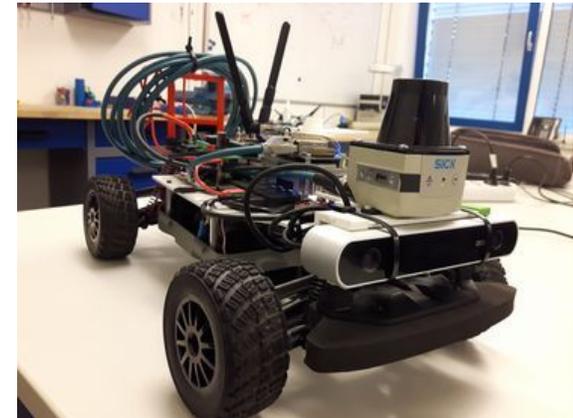
Szenarien:

Unfallfreie Fahrt. Autonome
Befahrung eines Parcours durch
ein Fahrzeug.

- Entwicklung eines echtzeitfähigen Fahrzeugassistenten
- Entscheidungsfindung: Ausweichstrategie oder Notbremsung



vordefinierter Parcours



ferngesteuertes Fahrzeug der Marke Traxxas

Abgrenzung zu unserer Projektgruppe



- ROS1
- Konstante Sollgeschwindigkeit
- Einen Fahrzeugassistenten
- Lidar
- Parcours

iTraffic



with TurtleBots

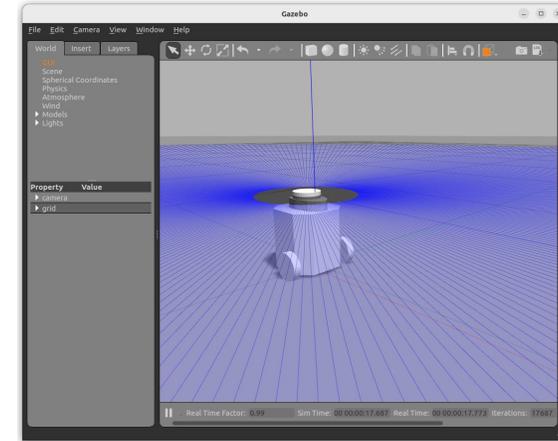
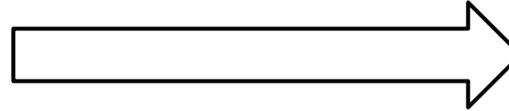
- ROS2
- Variable Geschwindigkeit
- Mehrere Fahrfunktionen
- Lidar, Kamera
- Autobahn

1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

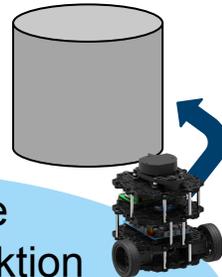
Vorprojekt: "Forschendes Lernen" - Mobiles Multiagenten-Robotersystem



GAZEBO



Simulink



"Wie kann eine autonome Fahrfunktion zum Umfahren eines Hindernisses entwickelt werden?"

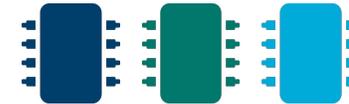
Python



"Wie wird realistisches Fahrverhalten simuliert?"

Unsere Alleinstellungsmerkmale

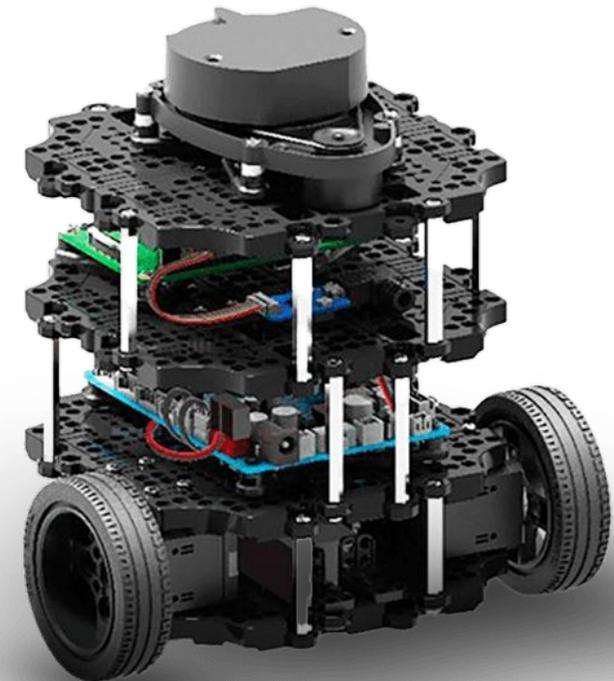
- Kombination mehrerer Sensoren
 - Erweiterbare Hardware
- Realitätsnähe
 - Umgebung: Autobahn
 - Betrachtung des TurtleBots als Auto
- Modulare Entwicklungsplattform:
 - Austauschbare Fahrzeugmodelle
 - Austauschbare Regler
 - Austauschbare Umgebungen
- Automatisierte Test-Plattform



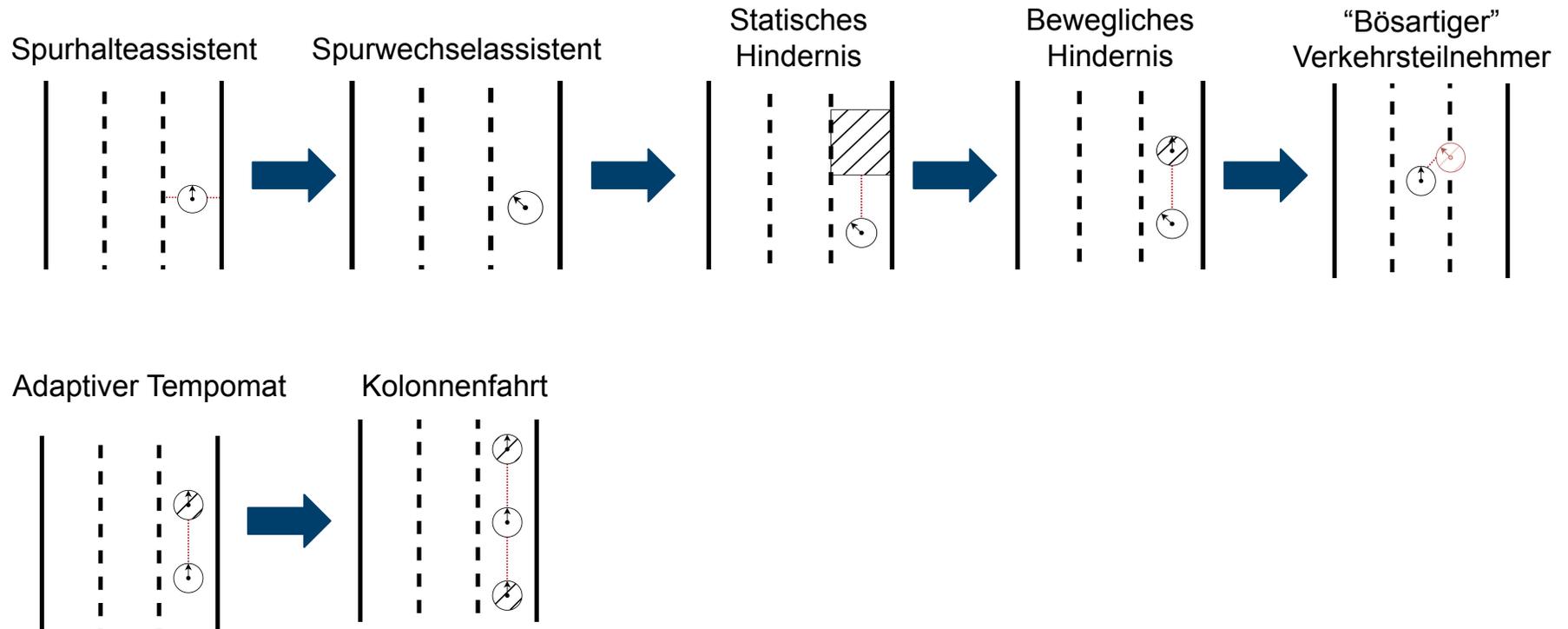
1. Vision
2. State of the Art
3. **Projektmanagement**
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

Projektmanagement

Carl Schneiders



Roadmap der Fahrfunktionen

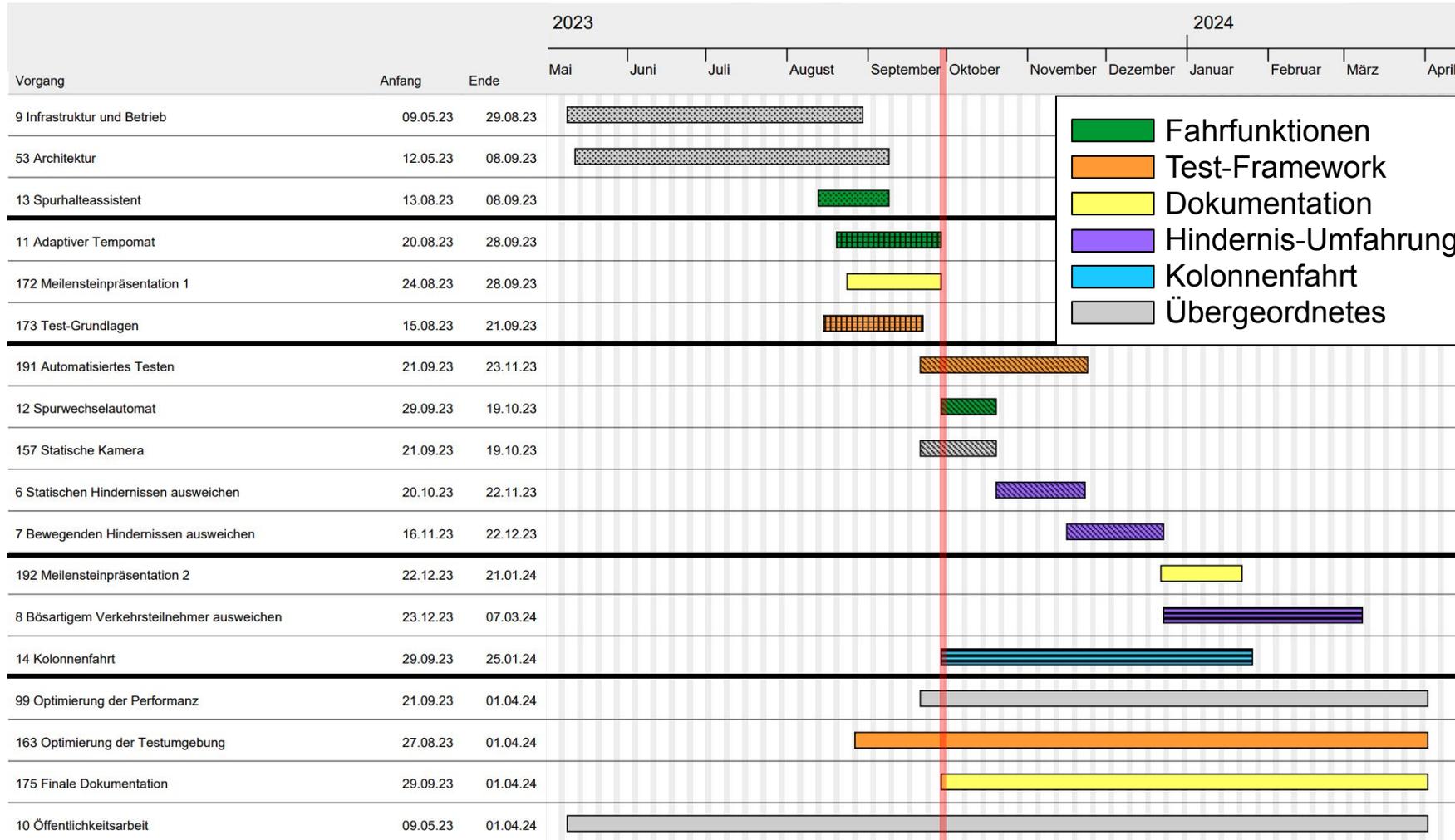


Zeitplan

Meilenstein	Startdatum	Enddatum
MS 1: Spurhalteassistent und grundlegende Architektur	05. Mai 2023	08. September 2023
MS 2: Adaptiver Tempomat und grundlegende Testbed-Funktionalität	09. September 2023	28. September 2023
MS 3: Hindernisumfahrung, Roboterkamera	29. September 2023	22. Dezember 2023
MS 4: Bössartiger Verkehrsteilnehmer und Kolonnenfahrt	23. Dezember 2023	07. März 2024

- 1. Vision
- 2. State of the Art
- 3. **Projektmanagement**
- 4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
- 5. Ausblick und Reflexion

Zeitplan



PG iTraffic - Erste Meilensteinpräsentation

Carl Schneiders

Arbeitsprinzipien



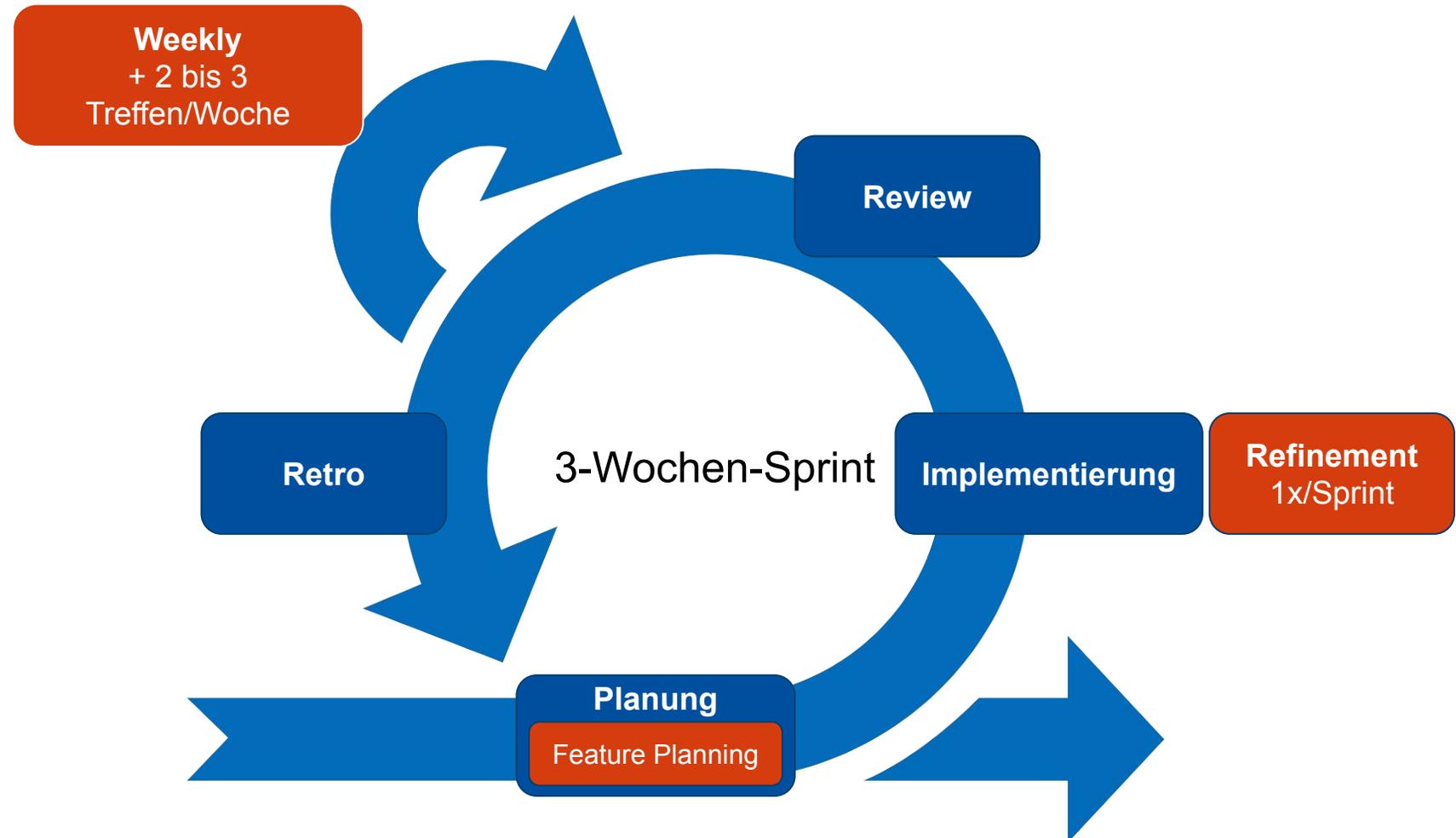
- Gesunde Gestaltung der PG
- Kein Burnout
- Klare und regelmäßige Kommunikation



- Kein Loggen von Zeit
- Review auf Vertrauensbasis
- Urlaub nach Absprache
- Kein Crunch

1. Vision
2. State of the Art
3. **Projektmanagement**
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

Scrum und Sprints



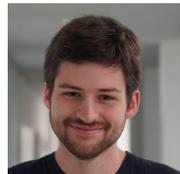
1. Vision
2. State of the Art
3. **Projektmanagement**
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

Rollenverteilung

Fachliche Leitung



Marie Marken
Product Owner



Lasse Heckelmann
Business Engineer

Entwicklungsteam



Malte Grave
Infrastruktur



Jan-Magnus Monenschein
Code Stewart



Filip Wojciak
Quality Assurance



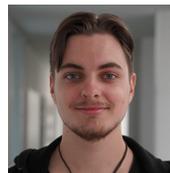
Stefan Gerber
Architektur



Julia Debkowski
Entwicklerin



Paulina Kowalska
Öffentlichkeitsarbeit



Nellson Eilers
Documentation Stewart



Simon Struck
Technische Leitung



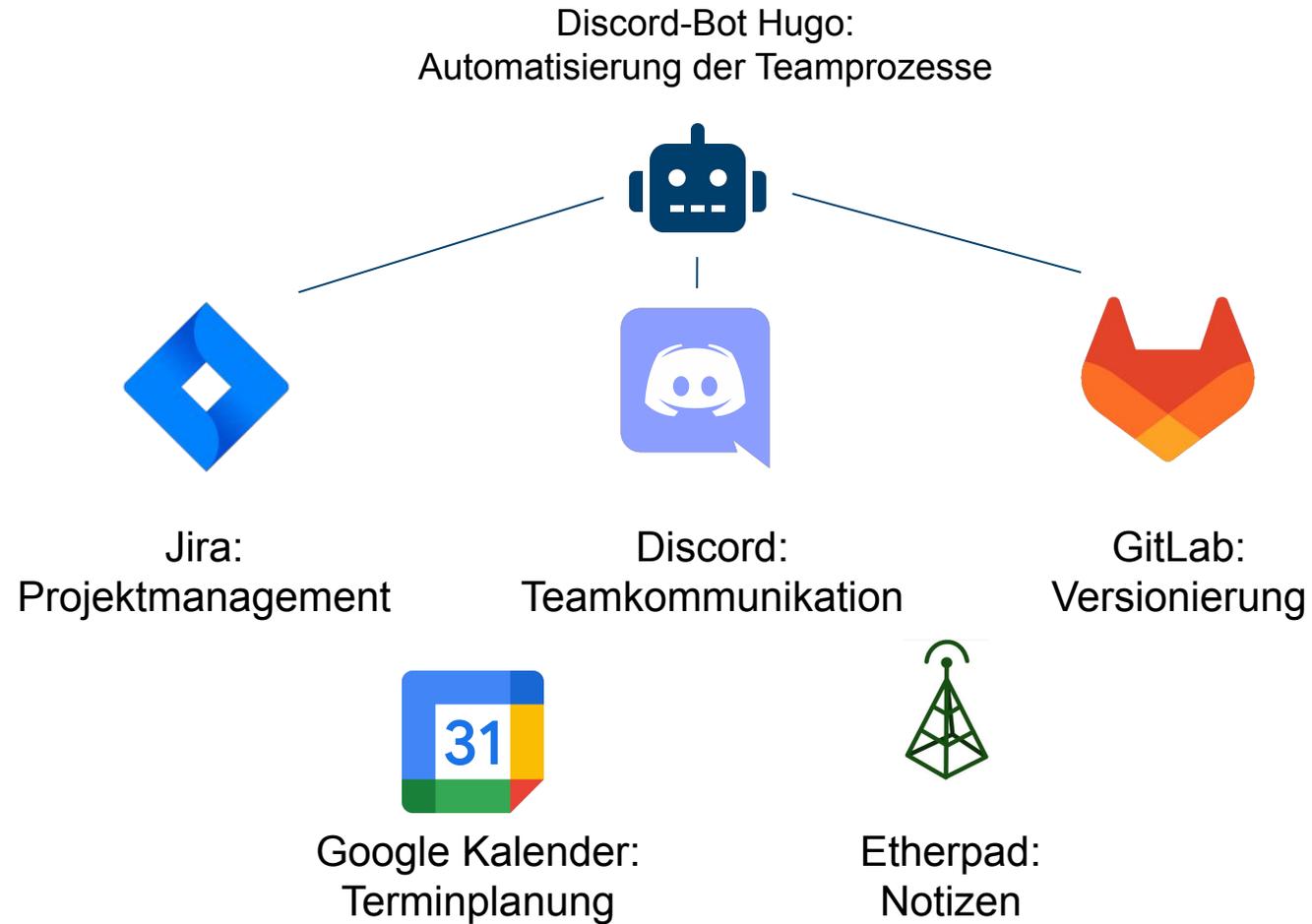
Marvin Kuhlmann (ehem.)
Infrastruktur

Prozessleitung



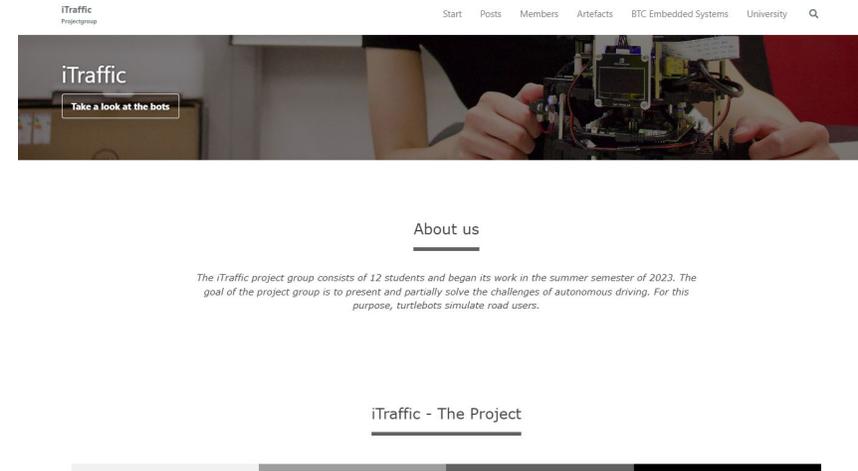
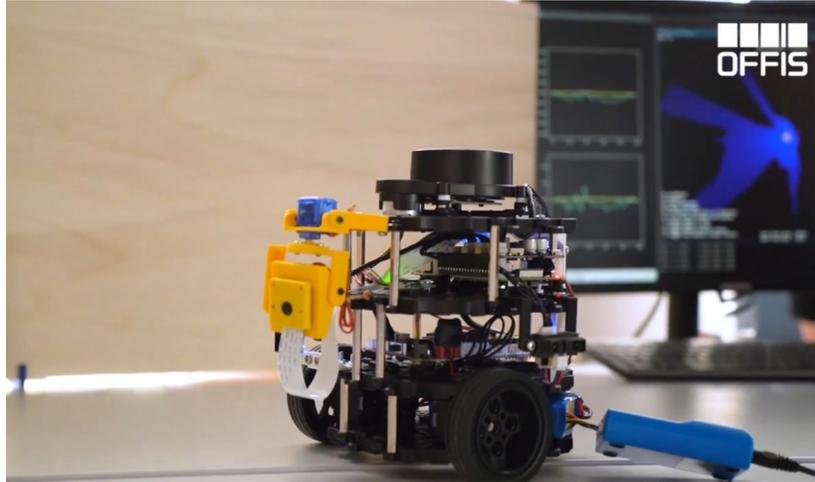
Carl Schneiders
Scrum Master

Tools



1. Vision
2. State of the Art
3. **Projektmanagement**
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

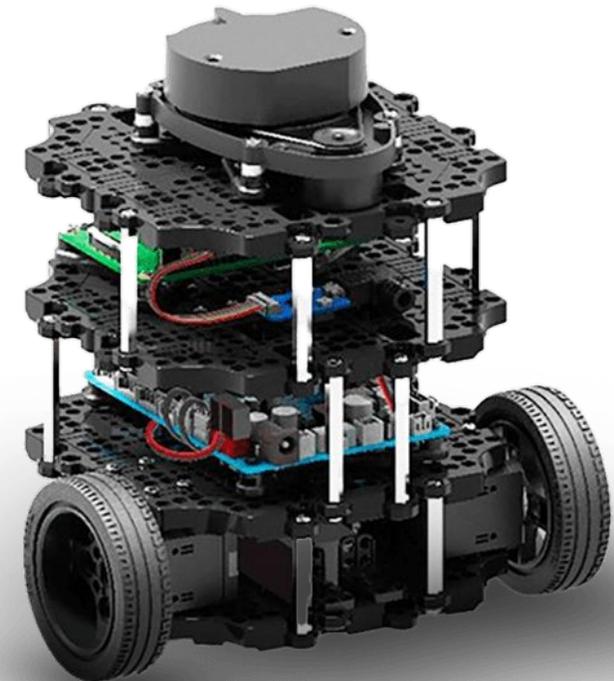
Öffentlichkeitsarbeit



1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

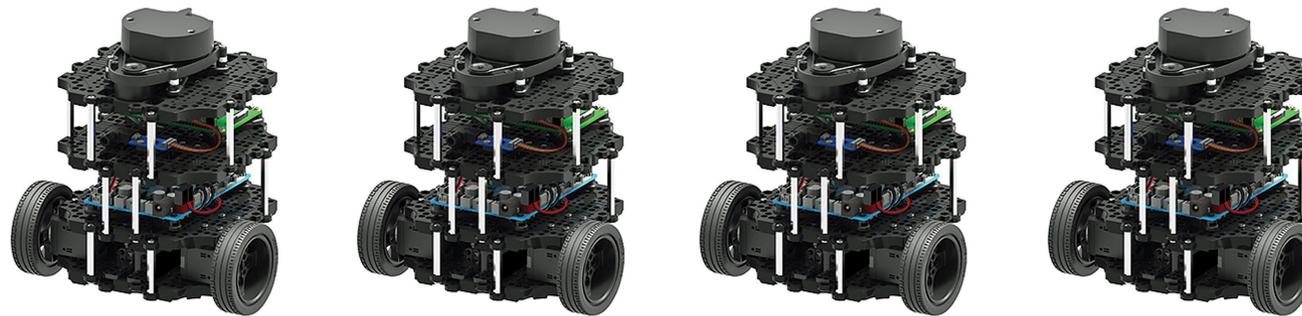
Umsetzung

Malte Grave
Jan-Magnus Monenschein
Nellson Eilers



Hardware

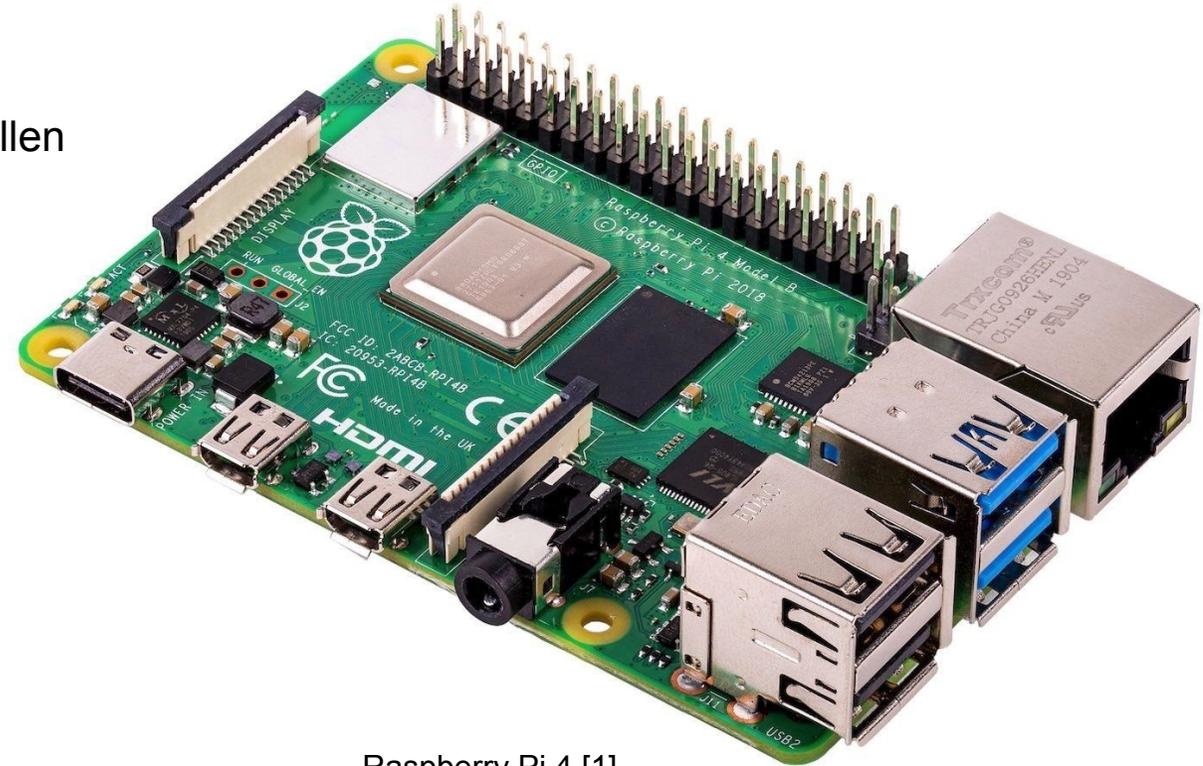
- TurtleBot 3 Burger Modelle
- Modulares Design
- Sensorik und Aktorik leicht nachrüstbar
- LIDAR, 2x IR, 2x Motoren, 2x Servo, Pi CAM
- 2-Achsen Camera mount



TurtleBot 3 Burger [0]

Hardware

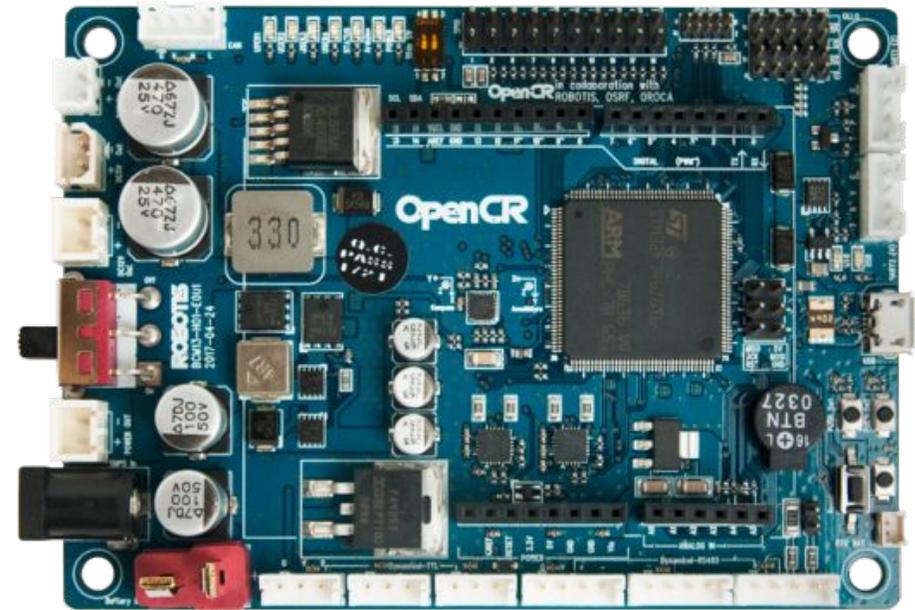
- Raspberry Pi 4 2GB
- Cortex-A72 (ARM v8) 1,5 GHz
- GPIOs, I2C, UART, SPI Schnittstellen
- emBRICK Header für Anschlüsse



Raspberry Pi 4 [1]

Hardware

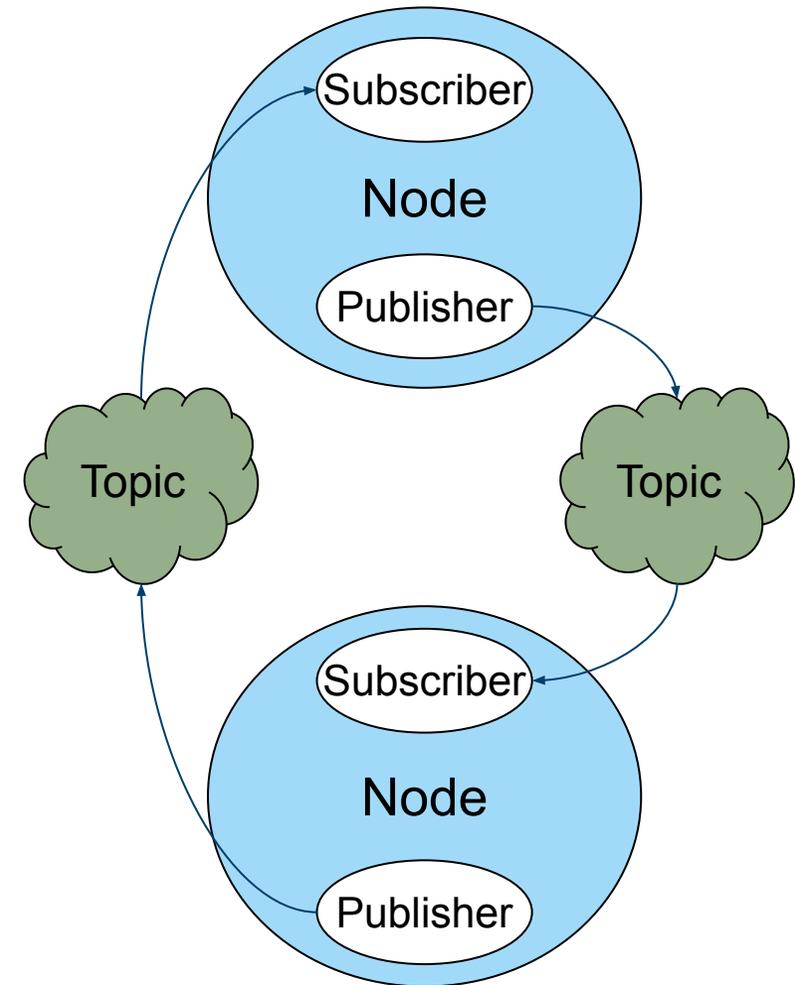
- OpenCR Board 1.0
- Agiert als Treiber
- STM32 / 32-bit ARM Cortex-M7 216MHz
- Kommunikation über USB bzw. UART
- ROS Abstraktionslayer



OpenCR Board 1.0 [2]

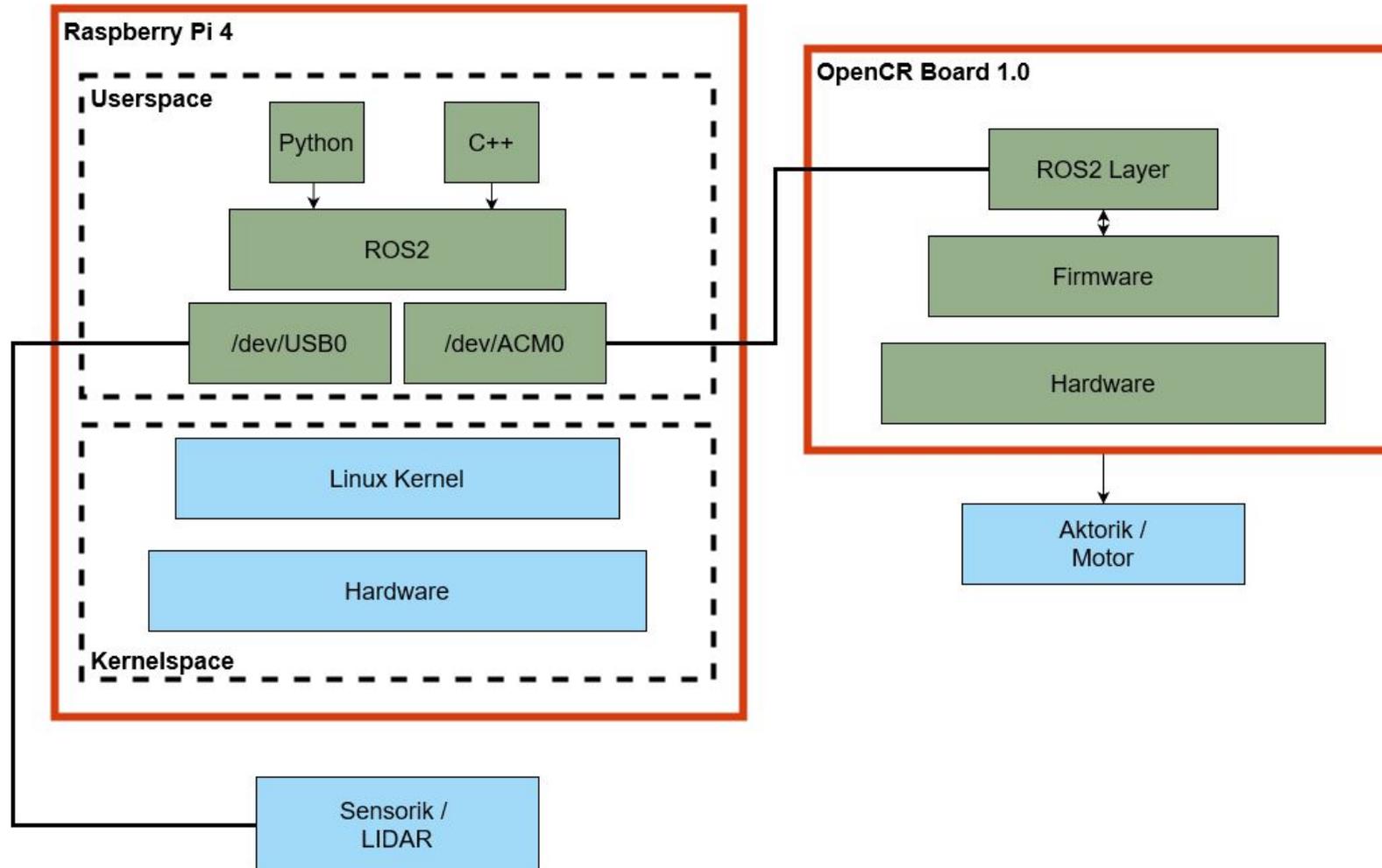
ROS Grundlagen

- Kommunikation via DDS
 - Topics als zentrales Konzept
 - Nutzt eine Domain ID
 - Insbesondere über Netzwerke
- Publisher und Subscriber greifen darauf zu
 - Werden in Nodes zusammengefasst
- Services und Action als spezielle “Topics”



1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

Kommunikation



MS 1: Spurhalteassistent und grundlegende Architektur

- Infrastruktur und Betrieb
- Implementierung von Fahrfunktionen ermöglichen
- Spurhalteassistent

Unsere Produkte

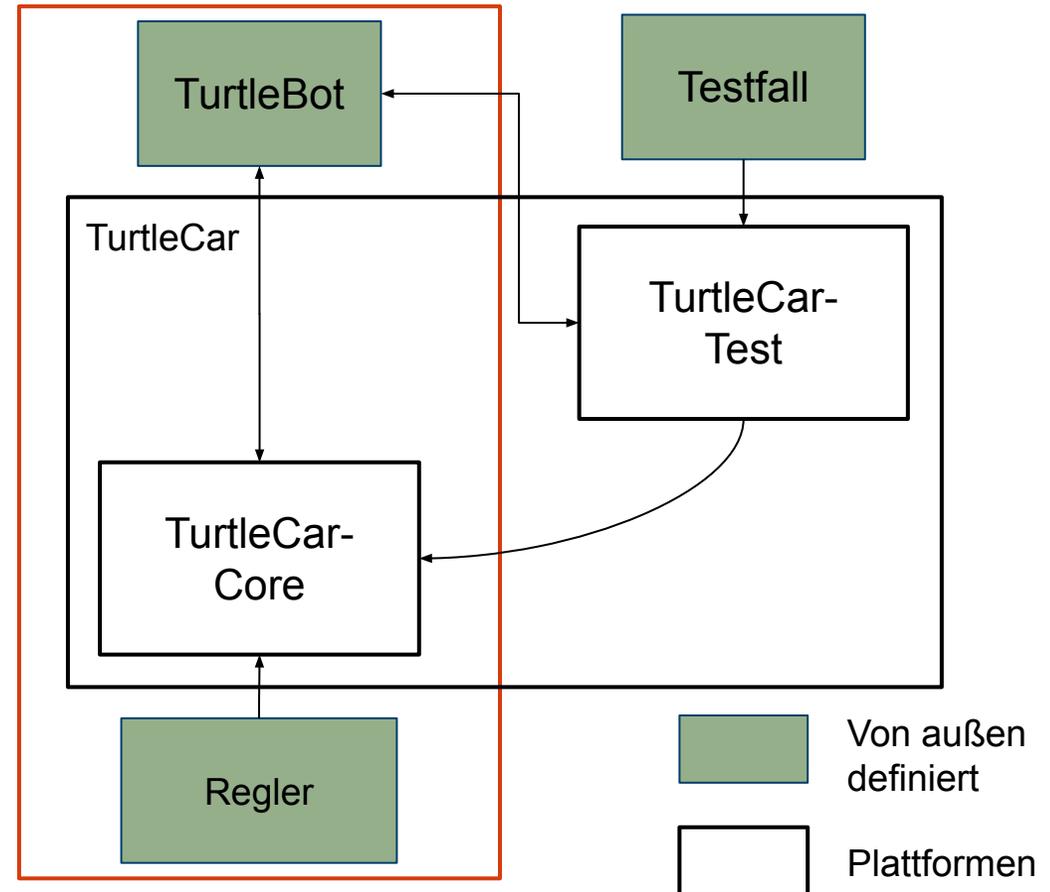
TurtleCar-Core 	TurtleCar-Test 	Fahrfunktionen 
<p>Entwicklungsplattform für autonome Fahrfunktionen</p> <ul style="list-style-type: none">● Emulation eines Autos auf dem TurtleBot● Definierte Schnittstelle für Sensoren und Aktuatoren in passenden Formaten● Entwicklung von Reglern gegen diese Schnittstelle	<p>Testplattform für autonome Fahrfunktionen</p> <ul style="list-style-type: none">● Einfache Definition von Testfällen● Simulatives & automatisiertes Testen von Fahrfunktionen	<p>...entsprechend den Szenarien der Vision</p> <ul style="list-style-type: none">● Entwicklung von Reglern gegen die TurtleCar-Schnittstelle● Nutzung von Modellprädiktiver Regelung● Ggf. Anbindung neuer Sensorik

Die Plattform TurtleCar

Ziele für TurtleCar

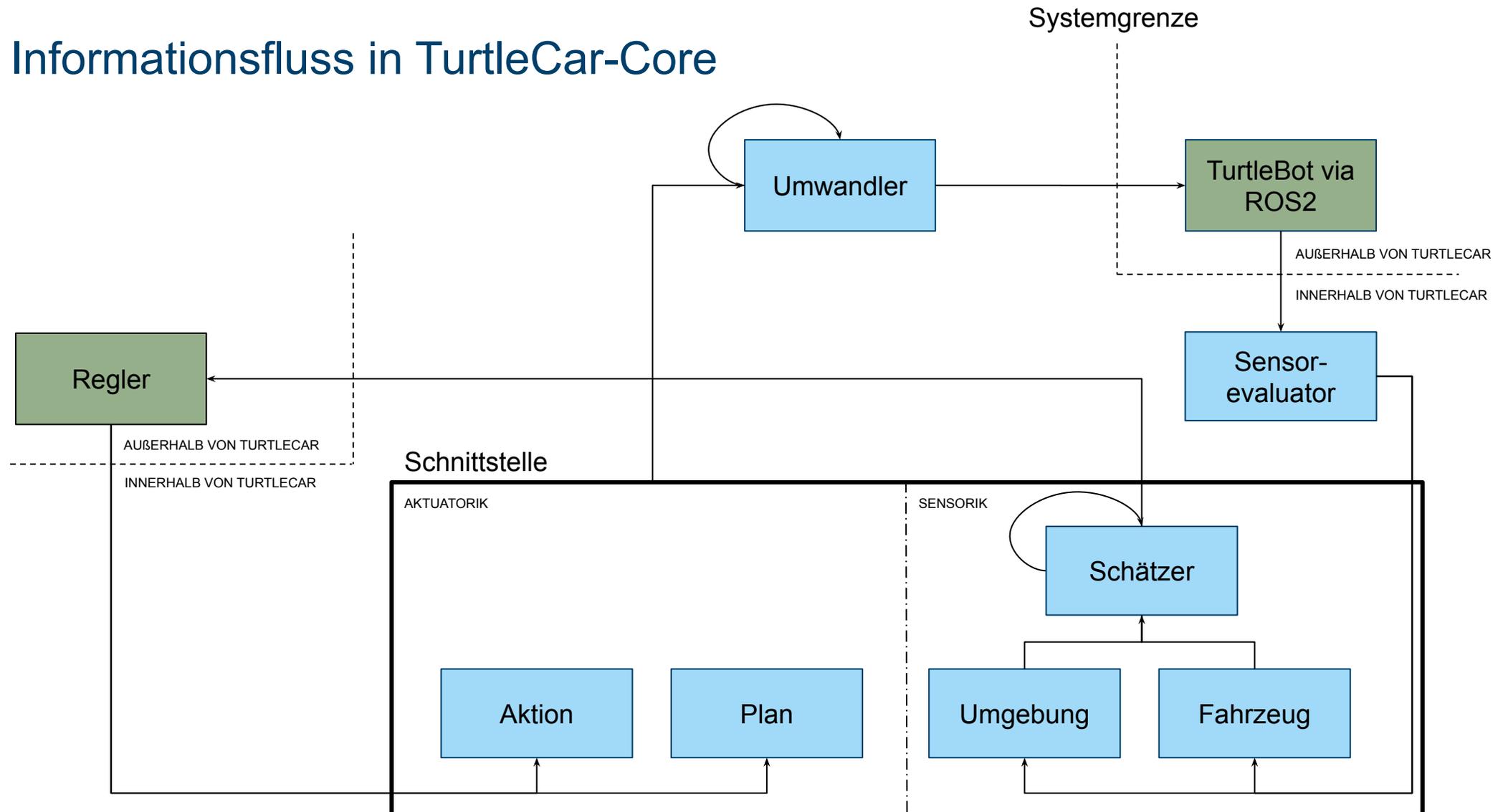
- Bereitstellung von Fahrzeug- und Umgebungsinformationen
- Klare Struktur und Architektur
- Erweiterbarkeit durch Dritte

Überblick



1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. **Meilenstein 1**
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

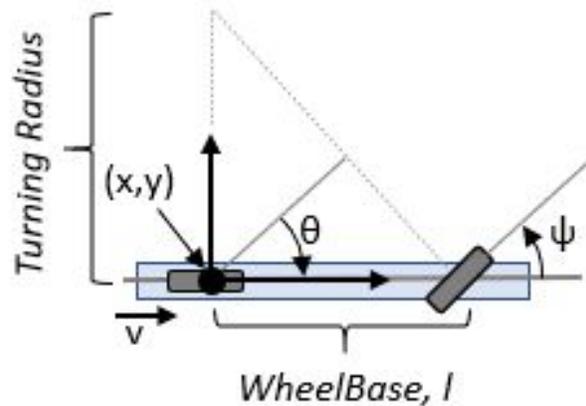
Informationsfluss in TurtleCar-Core



Fahrzeugmodelle

Bicycle Modell

- Reduziert Dynamiken auf zwei Achsen
 - Vorderrad: Lenkung
 - Hinterrad: Antrieb
- Berechnungen im Umwandler



[3]

Simpler Automotor

- Berechnung der Beschleunigung fürs Bicycle Modell
- Geschalteter Gang bestimmt die Antriebskraft des Motors

Antriebskraft:

$$F_t = \frac{T_e \cdot i_x \cdot i_0 \cdot \eta_d}{r_{wd}}$$

T_e = Drehmoment des Motors

i_x = Getriebeübersetzung

η_d, i_0 = Konstanten aus
Fahrzeugspezifikationen

r_{wd} = Reifenradius

Beschleunigung:

$$a_v = \frac{1}{m_v} [F_t - (F_r + F_a)]$$

F_r = Reibungswiderstand

F_a = Luftwiderstand

m_v = Masse des Autos

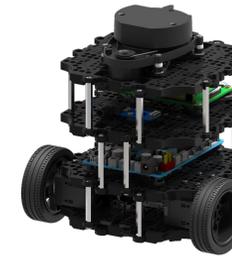
Fahrzeugmodelle

Fahrzeugtypen

- Modellierung verschiedener Verkehrsteilnehmer
 - Austauschbar durch Konfigurationsdateien
 - Realistische Szenarien
- Übersetzung der Parameter echter Autos



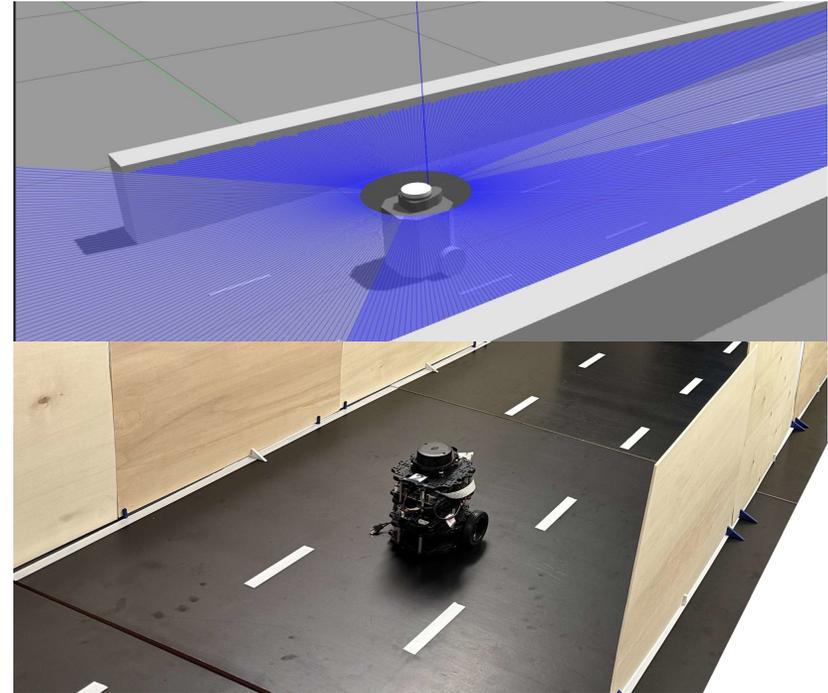
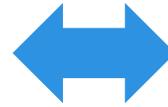
Jaguar F-Type [4]



VW-Golf 7 [5]

1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. **Meilenstein 1**
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

Umgebungsmodell



[6]

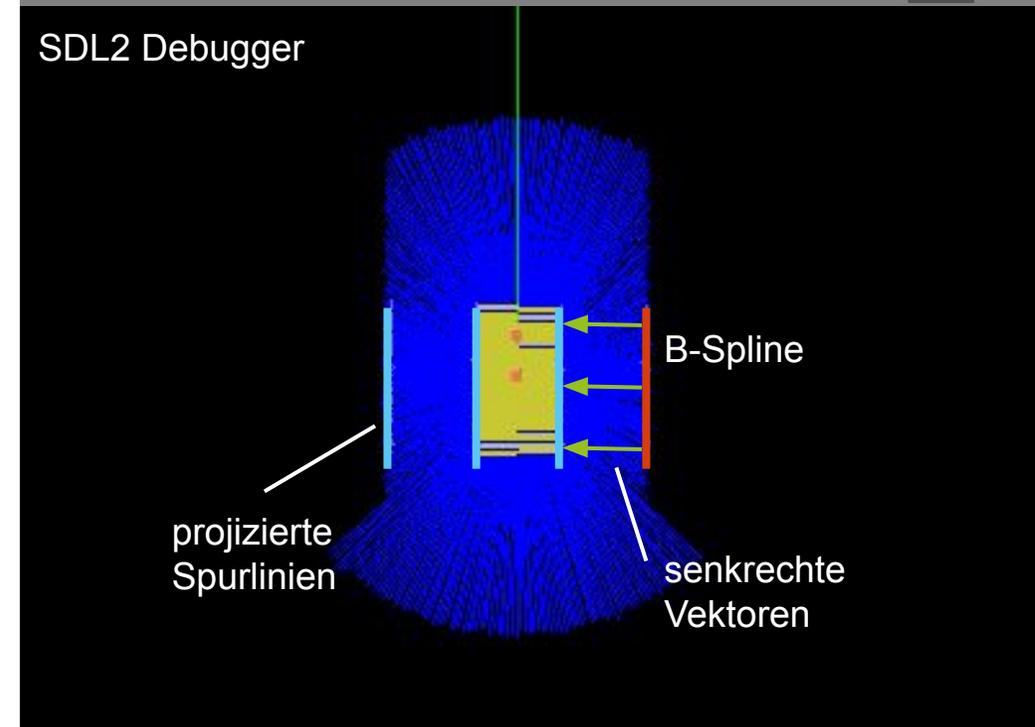
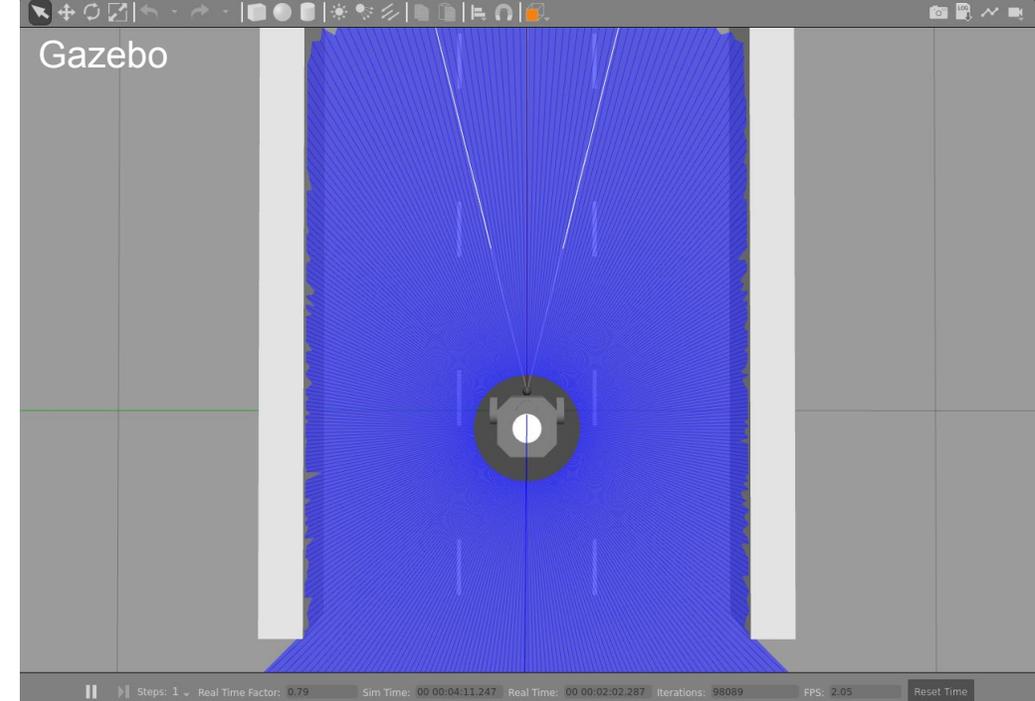
Spurerkennung mit LIDAR

Annahme:

- Wand rechts
- Definierte Umgebung wird genutzt

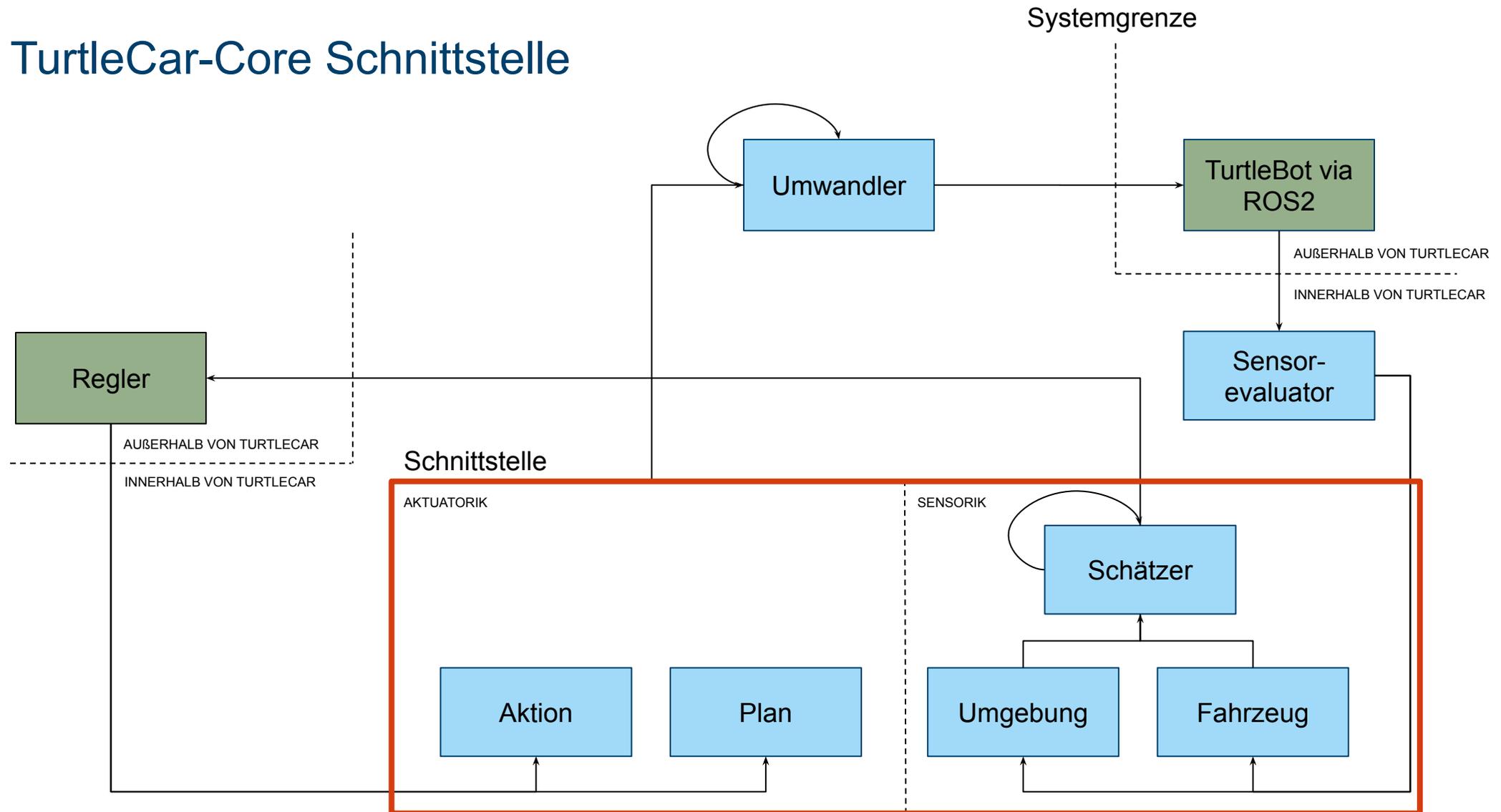
Funktionsweise:

1. Speicherung von Lidar-Messungen
2. Umrechnung in kartesisches Koordinatensystem
3. Berechnung einer B-Spline
4. Iteration der Messpunkte und je eine Berechnung eines orthogonalen Vektors
5. Projektion weiterer Spurlinien durch Vektoren



1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. **Meilenstein 1**
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

TurtleCar-Core Schnittstelle

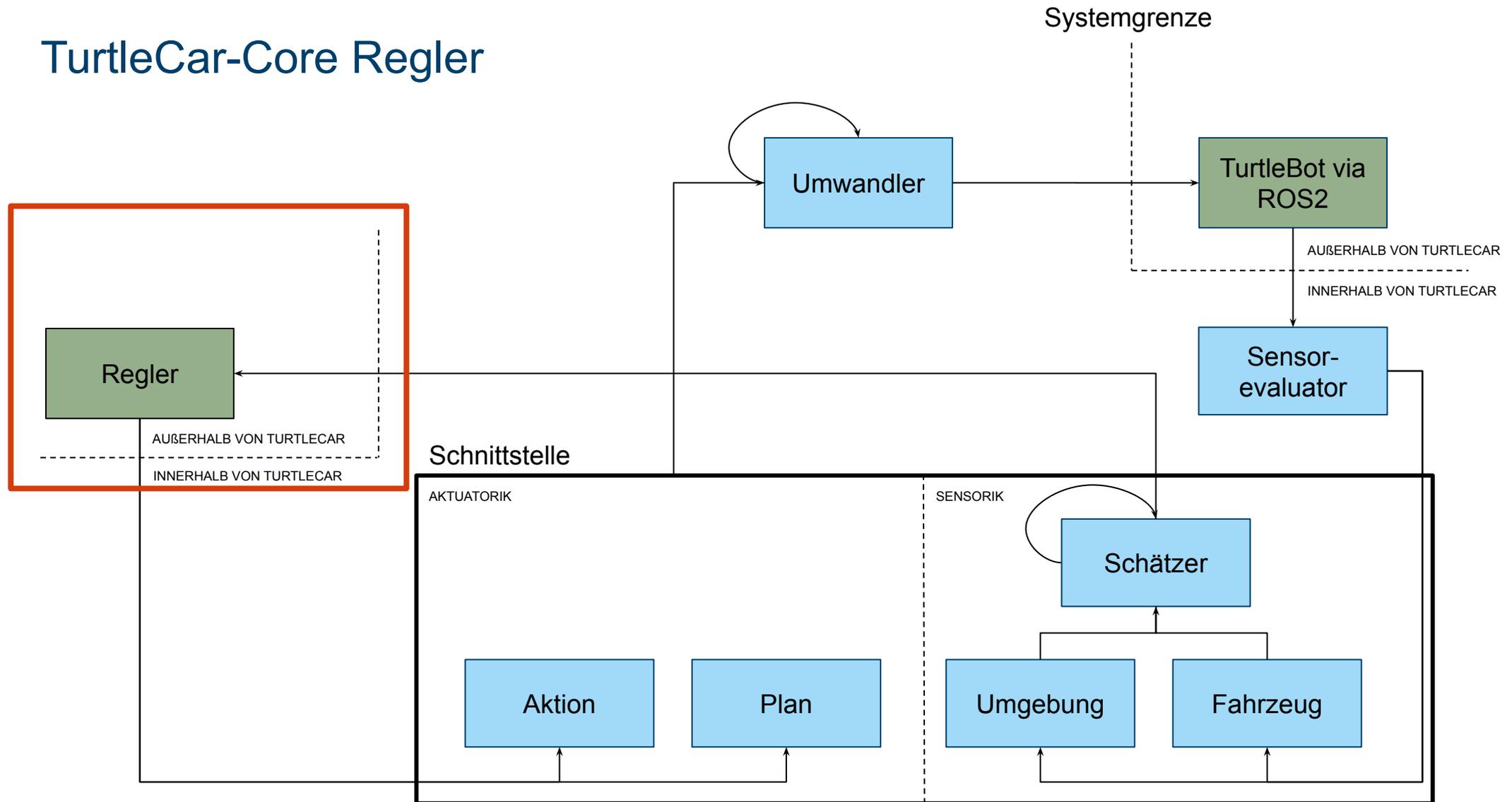


TurtleCar-Core Schnittstelle

Modul	Verfügbare Daten
Aktion	Schnittpunkt zur Steuerung des Roboters
Plan	Geplanter Pfad in 2D-Punkten
Fahrzeug	<ul style="list-style-type: none">● Drehmoment● Fahrwiderstand● Geschwindigkeit● ...
Umgebung	<ul style="list-style-type: none">● Hinderniskoordinaten● Verkehrsschilder● Spurdaten● ...

1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. **Meilenstein 1**
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

TurtleCar-Core Regler



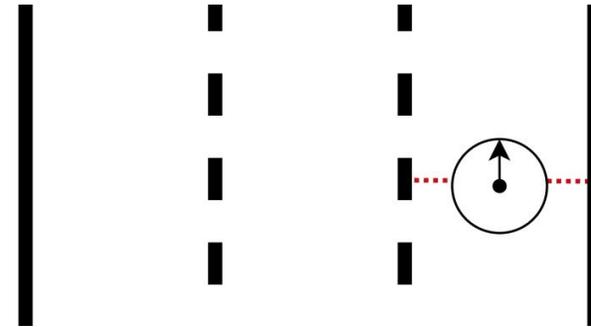
Spurhalteassistent

Funktionale Anforderungen:

- Gezielt ein- / ausschalten
- Spurverlauf identifizieren
- Spurmitte folgen

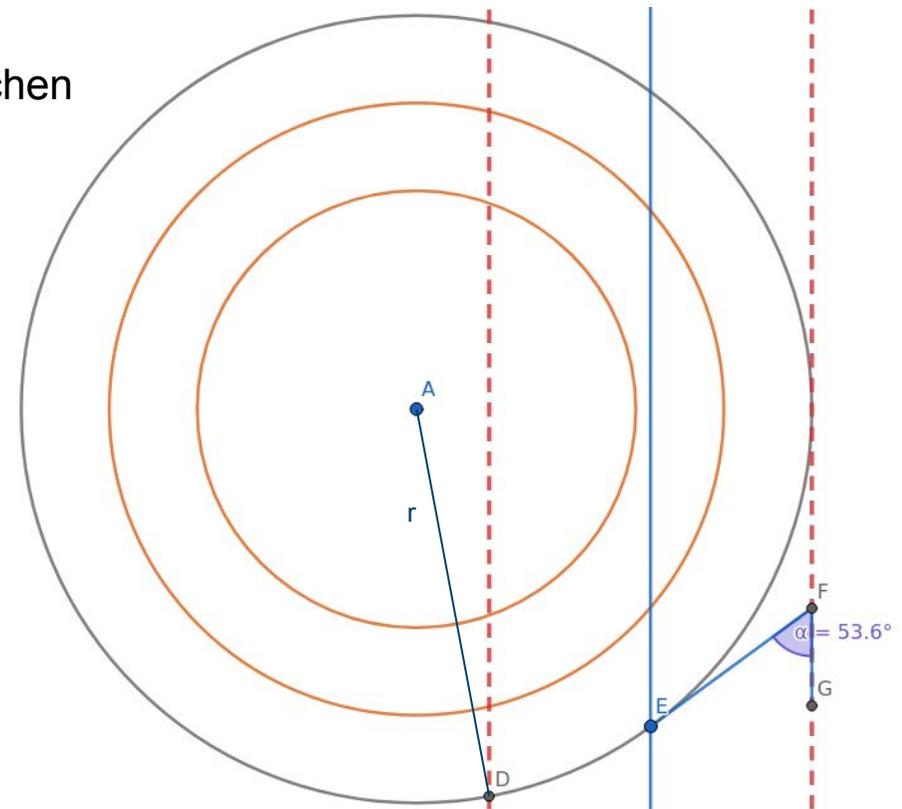
Nicht funktionale Anforderungen:

- Modellvorhersage nutzen
- Anwendbar für Geschwindigkeiten von 0 bis 120 km/h



Initialbedingungen

- Engster möglicher Wendekreis: $r = \frac{l}{\tan(a)} + \frac{b}{2}$
- Anlegen des Wendekreises an den Fahrbahnrand
- Maximale Lenkorientierung ist der Winkel zwischen Kreis-Tangente und Fahrbahnrand
 - Für Mitte der Fahrbahn: $53,6^\circ$
- 25% zusätzlicher Spielraum
 - Für Mitte der Fahrbahn: $40,2^\circ$



Modellprädiktive Regelung

Bicycle-Modell

$$\dot{x}_1 = \dot{Y} = v \cdot \sin(x_2)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{\theta} = \frac{v}{l} \cdot \tan(u_1)$$

Linearisierung

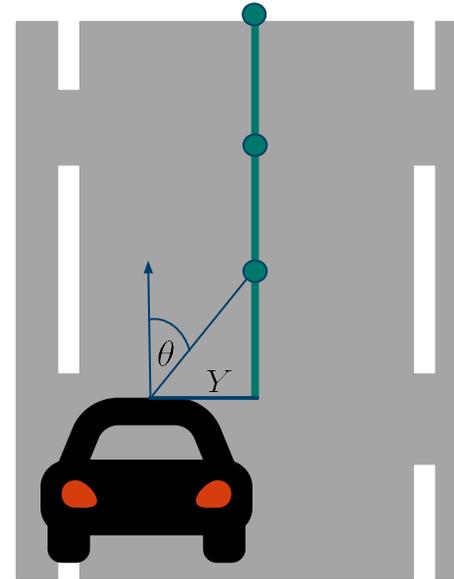
$$Y_s = 0, \theta_s = 0$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{v}{l} \end{bmatrix} \cdot \left(- [k_1 \quad k_2] \cdot \begin{bmatrix} Y \\ \theta \end{bmatrix} \right)$$

Eigenwertplatzierung

$$\mathcal{R}\{\lambda\} \leq -2$$

für robuste Stabilität bei variabler
Geschwindigkeit v



Nutzungsbereich

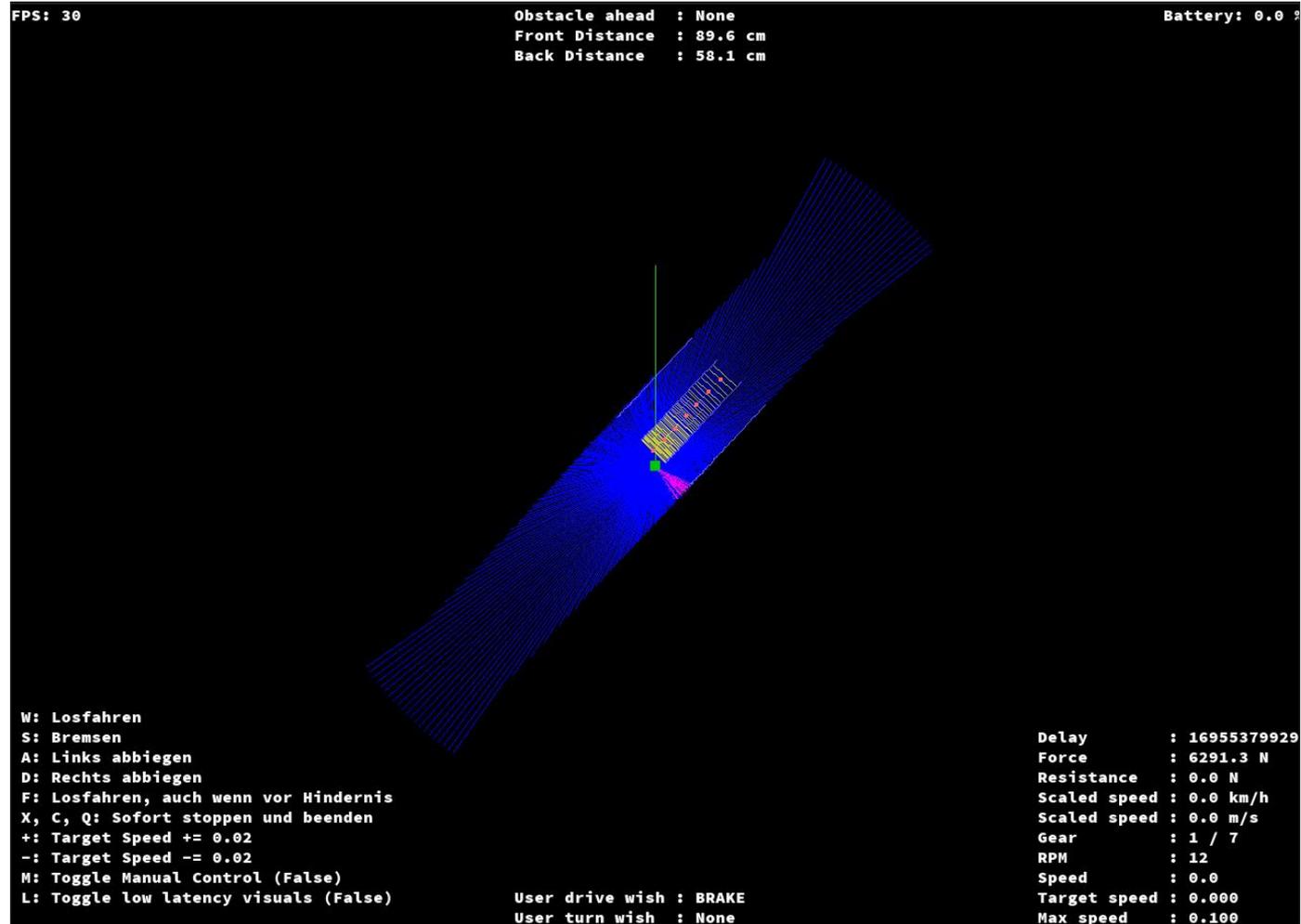
$$v \in [0.5, 34] \text{ m/s} \Rightarrow k_2 \in [0.05, 1.4]$$

Gewählte Regelkonstante

$$k_2 = \frac{l}{v}$$

1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

Spurhalteassistent



MS 2: Adaptiver Tempomat und grundlegende Testbed Funktionalität

- Ausführung von Integrationstests über das Testbed
- Umsetzung der Fahrfunktion: “Adaptiver Tempomat”

Validierung von Fahrfunktionen

Simulativ:

- Einfaches Setup
- Fokus auf Realitätsnähe

Experimentell:

- Manuelles Testen in der physischen Realität
- Visuelle Evaluation

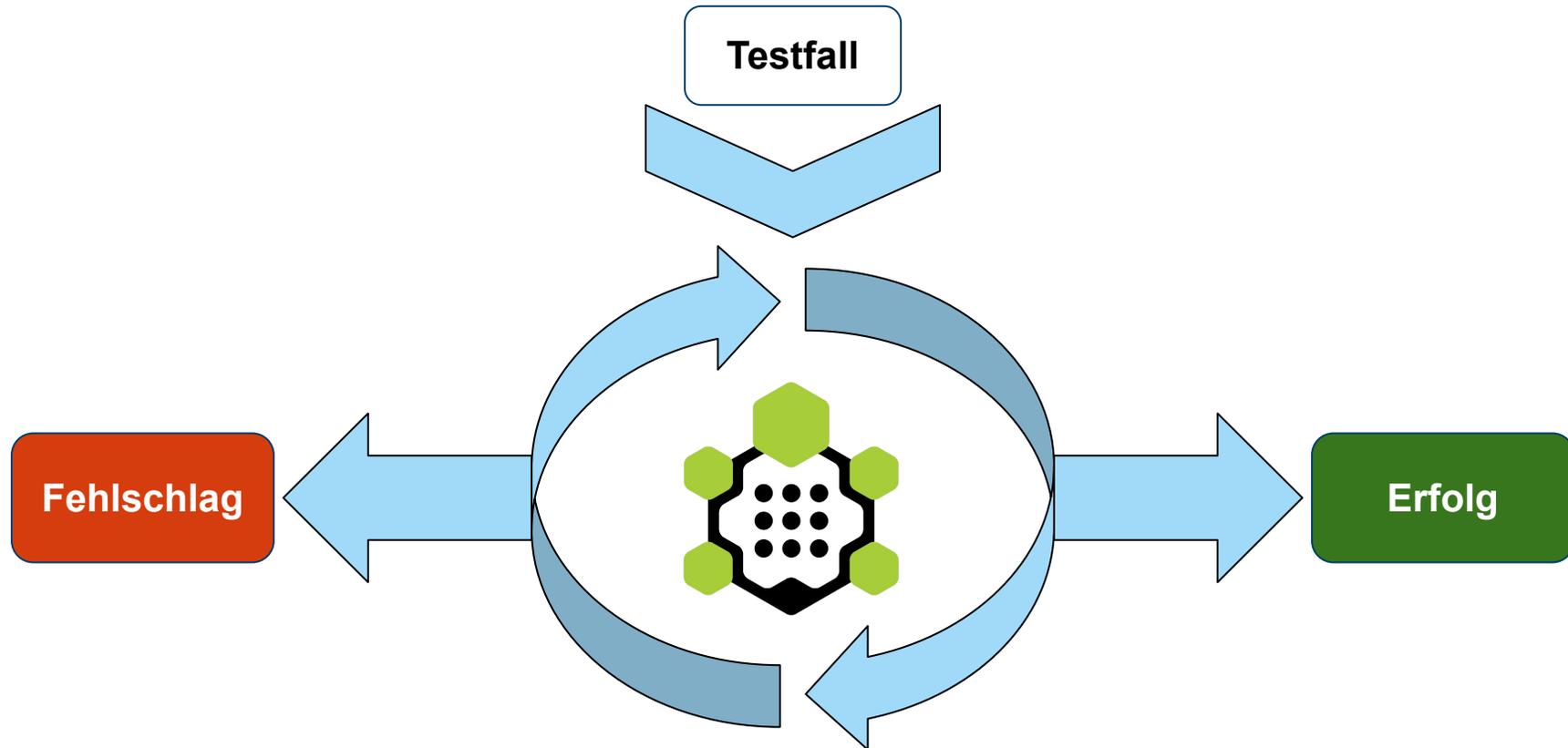
Evaluation der
erfüllten
Anforderungen

Formale Tests:

- Integration in Szenarien
- Definition von formalen Kriterien
- Auswertung einzelner Testfälle

Validierung der
erfüllten
Anforderungen

Grundlagen Test-Plattform



Definition von Testfällen

Startbedingungen:

- Anzahl Roboter
- Startposition / -rotation
- Fahrzeugmodell

Eingabebefehle:

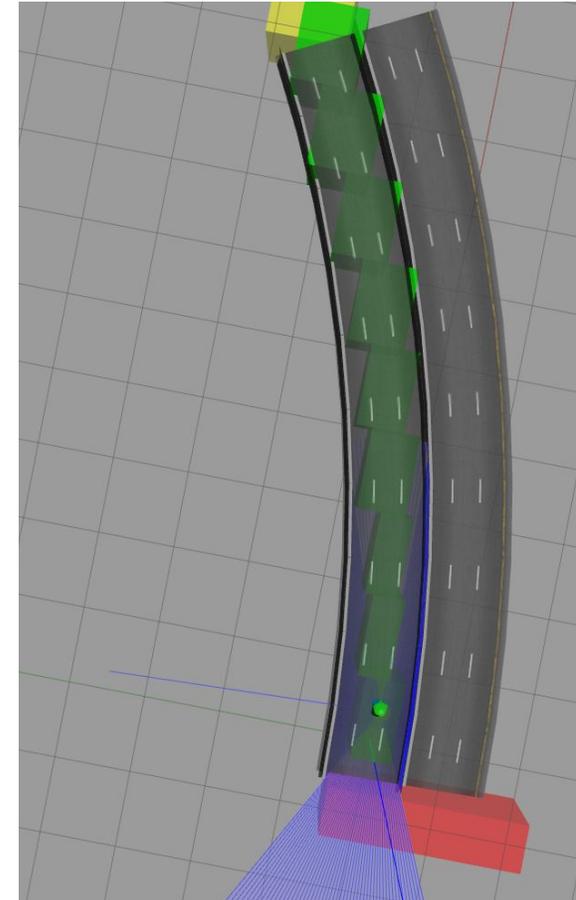
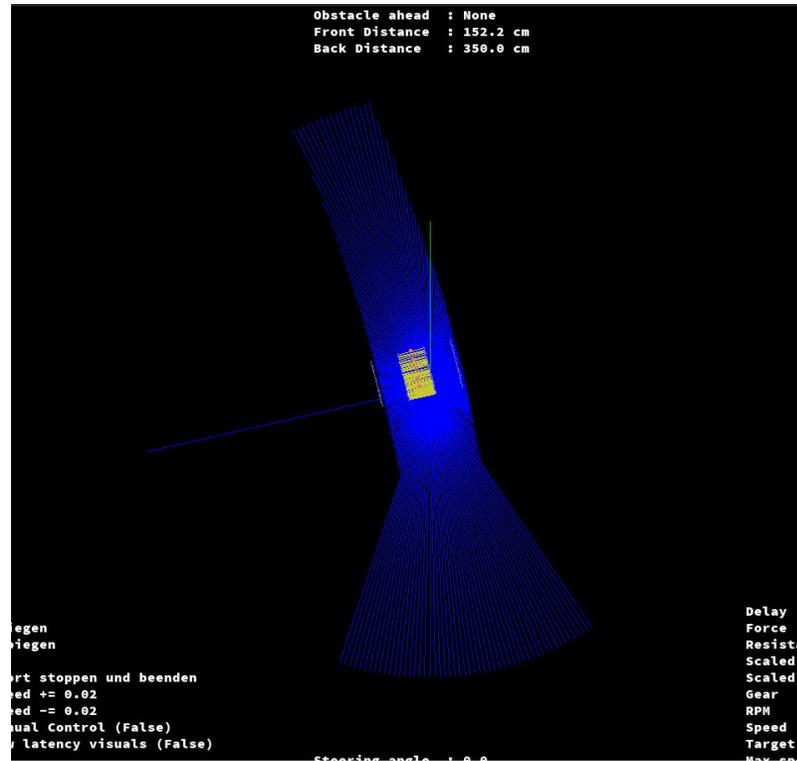
- Beschleunigen
- Lenken
- Bremsen

Formale Kriterien:

- Timeout
- Position
 - Erreichbare Flächen
 - Beschränkende Flächen
 - Verbotene Flächen
- Weitere Restriktionen
 - Rotation
 - Geschwindigkeit

1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. **Meilenstein 2**
5. Ausblick und Reflexion

Testfall Spurhalteassistent



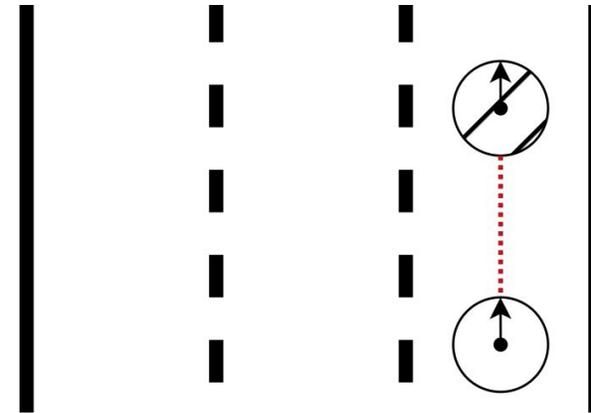
Adaptiver Tempomat

Funktionale Anforderungen:

- Gezielt ein- / ausschalten
- Sicherheitsabstand einhalten
- Automatische Geschwindigkeit

Nicht funktionale Anforderungen:

- Modellvorhersage nutzen
- Erfüllt die StVO-Anforderungen an Sicherheitsabstände



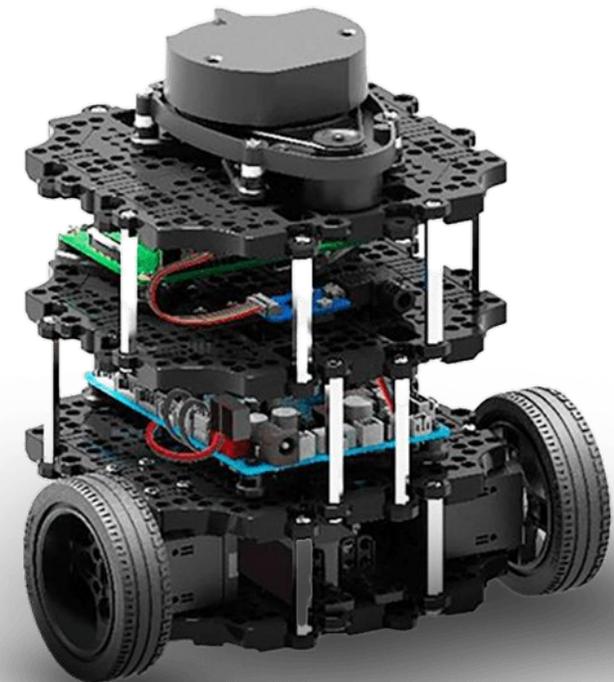
Adaptiver Tempomat

- Der adaptive Tempomat verwendet eine Modellvorhersage (linearisiertes Bicycle-Modell)
- Der minimale Sicherheitsabstand basiert auf Recherche (StVO §2 & §4)
 - Faustformel 1: Halber Tacho in Meter
 - 50 km/h → 25 m
 - 100 km/h → 50 m
 - Faustformel 2: Innerorts 1 Sekunde, Außerorts 2 Sekunden
 - 50 km/h → 13,9 m
 - 100 km/h → 55,6 m

1. Vision
2. State of the Art
3. Projektmanagement
4. Umsetzung
 - a. Hardware
 - b. Meilenstein 1
 - c. Meilenstein 2
5. Ausblick und Reflexion

Ausblick und Reflexion

Carl Schneiders



Zusammenfassung

Bisher erreicht:



TurtleCar-Core:
Entwicklungsplattform für
Fahrfunktionen



TurtleCar-Test: Testplattform
zur automatisierten Validierung



Aufbau von Testszenarien



Fahrspurerkennung



Spurhalteassistent

Nächste Schritte:



Abstandstempomat



Spurwechselassistent



Ausweichen von stationären
und beweglichen Objekten



Sicheres Verhalten bei
böartigen Verkehrsteilnehmern



Kolonnenfahrt

Reflexion

Interne Prozesse im Turtlebot
schlecht sichtbar

Fehlende Odometrie-Daten

Lange Sprintplanung

Mangelnder übergreifender Fokus

Zeitweise Personalmangel bei
hoher Arbeitslast

Umfassendes grafisches Debug-Tool

Rekonstruktion aus vorhandenen Daten

Einführung der Refinements

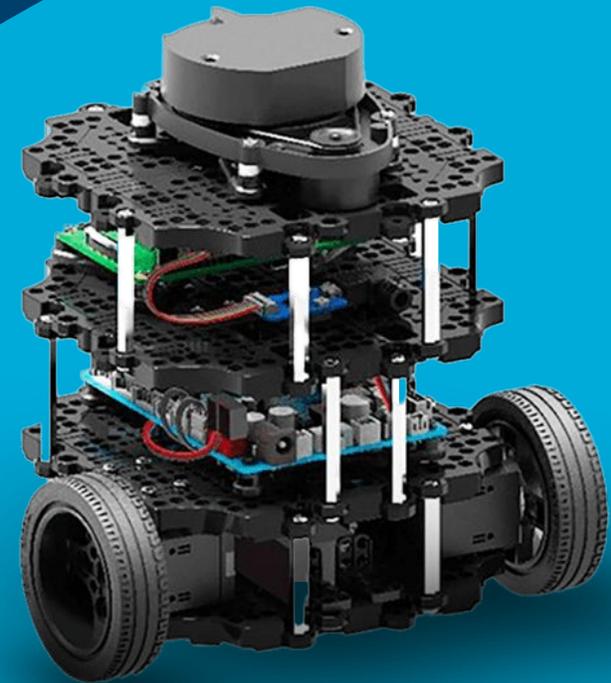
Klare Definition von Meilensteinen und
Deadlines über Sprintgrenzen hinaus

Urlaub enger mit dem Team abstimmen

Carl von Ossietzky
Universität
Oldenburg

Live-Demo

im PG Raum U104



Quellen

- [0]: <https://www.elektor.de/robotis-turtlebot3-burger-incl-raspberry-pi-4>
- [1]: <https://www.berrybase.de/raspberry-pi-4-computer-modell-b-2gb-ram>
- [2]: <https://emmanual.robotis.com/docs/en/parts/controller/opencr10/>
- [3]: <https://de.mathworks.com/help/nav/ref/bicyclekinematics.html>
- [4]: <https://auer-gruppe.de/wp-content/uploads/2019/11/Jaguar-F-TYPE-Fahrzeugbild.jpg>
- [5]: <https://www.pngegg.com/en/png-ppmhv>
- [6]: <https://pixabay.com/photos/road-car-vehicle-transportation-1658810/>