

R O B O T I K P R A K T I K U M

Wintersemester 2017/ 2018

Dokumentation - Gruppe 1

tin101030 - Julian Finck

tin101364 - René P. Keller

inf101301 - Lea Morschel

tin101313 - Adrian Sorge

tin101087 - Julian Weihe

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
1.1	Zielsetzung	3
2	Grundlagen	5
2.1	Hardwareplattform	5
2.1.1	Grundkomponenten	5
2.1.2	Rechner	5
2.1.3	Aktoren	5
2.1.4	Sensoren	5
2.2	Softwareplattform	6
2.2.1	ADTF-Framework: Grundlegende Strukturen	6
3	Implementierung	8
3.1	Umgebung	8
3.2	Projektstruktur	8
3.2.1	Linienerkennung und -verfolgung	8
3.2.2	Abstandserkennung und -verwertung	11
3.2.3	Motoransteuerung	14
3.2.4	Fusionsschnittstelle	16
3.3	Fallstricke: Komplikationen und Fehler	16
4	Auswertung	17
	Abbildungsverzeichnis	18
	Literaturverzeichnis	19

1 Einführung

Das Robotik-Praktikum, wessen Ergebnis diese Dokumentation festhält, fand parallel zur und in Kombination mit der Bachelor-Vorlesung 'Einführung in die Robotik' statt, welche von Herrn Prof. Dr. Ulrich Hoffmann im Wintersemester 2017 gehalten wurde.

Ziel war die Vertiefung und Anwendung der in der Vorlesung vermittelten Inhalte, wobei der diessemestrige Schwerpunkt auf autonomen Robotern lag. Im Praktikum wurde mit einem AADC¹ 2017 Audi-Modell im Maßstab 1:8 gearbeitet. Es sollte zu Beginn eine nicht näher eingeschränkte Zielsetzung ausgearbeitet werden, welche auf der grundlegenden Anforderung der kollisionsfreien Fahrt aufbauen sollte.

1.1 Zielsetzung

Im Kontext der gegebenen Grundanforderung der Kollisionsvermeidung wurden eigene Ziele definiert. Das Auto sollte später in der Lage sein, einer zentralen blauen Fahrbahnmarkierung zu folgen, dies unter verschiedenen Lichtverhältnissen. Bei Näherkommen eines von Ultraschallsensoren detektierbaren Hindernisses soll das Modell langsamer werden und vor ihm zum Stehen kommen sowie die Fahrt erst wieder aufnehmen, wenn die Sensoren signalisieren, dass die Fahrbahn wieder frei ist.

Die zu Beginn des Praktikums ausgearbeitete Roadmap findet sich in Abbildung 1.

¹Audi Autonomous Driving Cup[1]

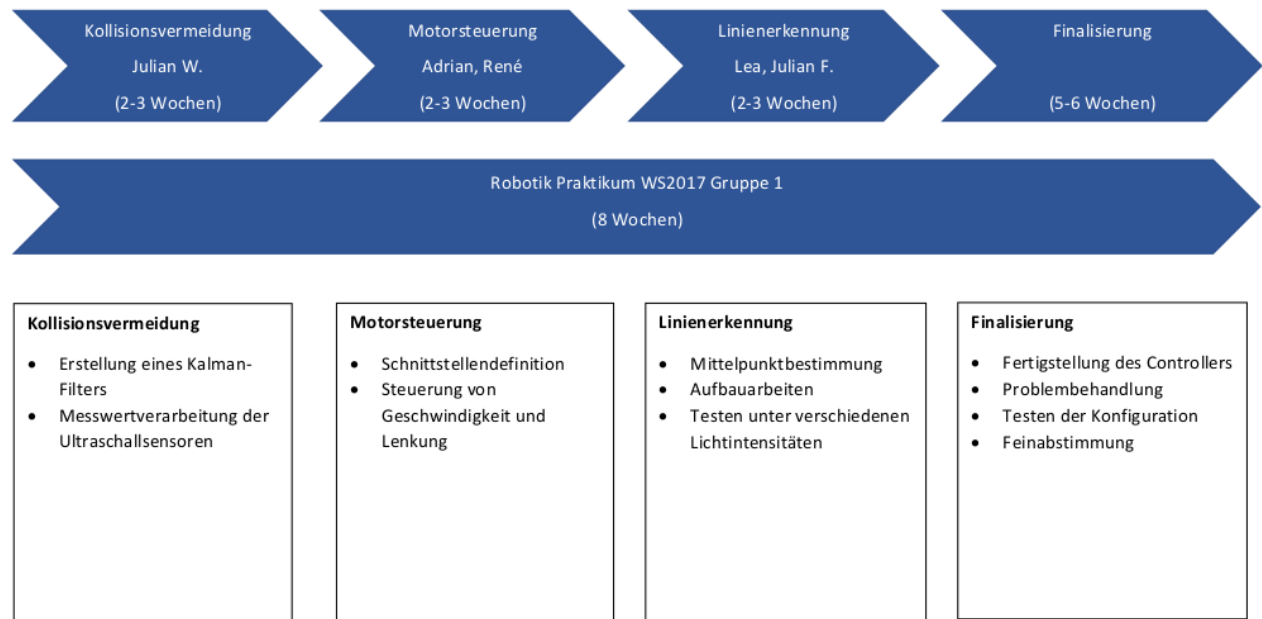


Abbildung 1: Zu Projektbeginn erstellte Roadmap

Die Umsetzung des Projektes wurde zu Anfang in vier Bereiche unterteilt:

1. Linienerkennung und -verwertung
 - a) Mittelpunktbestimmung
 - b) Testen unter verschiedenen Lichtintensitäten
2. Abstandserkennung und Kollisionsvermeidung
 - a) Messwertverarbeitung der Ultraschallsensoren
 - b) Messwertglättung durch Filterung (Kalman)
3. Motorsteuerung
 - a) Schnittstellendefinition zur Ansteuerung
 - b) Steuerung von Geschwindigkeit und Lenkung
4. Zusammenbringung/ Fusionsschnittstelle
 - a) Definition und Ausarbeitung des Controllers (Verhaltens-Logik)
 - b) Problembehandlung, Feinabstimmung, Testung

2 Grundlagen

Im Folgenden werden die Grundlagen, bestehend aus Aufbau des genutzten Modellautos, der darauf laufenden Software, sowie das genutzte Framework erläutert, welche für das Verständnis des Projektes essenziell sind.

2.1 Hardwareplattform

Das Audimodell bietet verschiedene Hardwarekomponenten, um das autonome Fahren zu verwirklichen.

TODO: Bild vom Audi gesamt

2.1.1 Grundkomponenten

Die Stromversorgung während der Fahrt wird durch zwei Akkus sichergestellt.

2.1.2 Rechner

Herzstück des Audi ist das *GIGABYTE GA-Z170N-WIFI miniITX* Mainboard. Unterstützt wird es von einer *NVIDIA GeForce GTX 1050Ti*.

TODO: Bild vom Audi, vor allem mit der Intel

2.1.3 Aktoren

Angetrieben wird das Modell von vier *Hacker SKALAR 10 21.5 Brushless Motor 1/10*. Die Lenkung funktioniert über *Absima 'ACS1615SG' Combat Series* Servos.

2.1.4 Sensoren

Die Linienerkennung arbeitet mit der Intelkamera, die mit einer anderen Position und einem anderen Winkel benutzt wird, als im Basismodell. Zum Vergleich siehe Abbild 1 und 2. Grund ist der verbesserte Blick auf den Nahbereich und das mittig ausgerichtete Bild.

TODO: Bild von den Sensoren und Arduinos

Zur Kollisionsvermeidung werden die verbauten Ultrasonic Sensoren verwendet (siehe Abbildung 2). Ansteuern lassen sich diese über Arduinos, die mit dem Mainboard verbunden sind. Der Audi besitzt insgesamt zehn Stück, von denen fünf, in unterschiedlichen Winkeln, nach

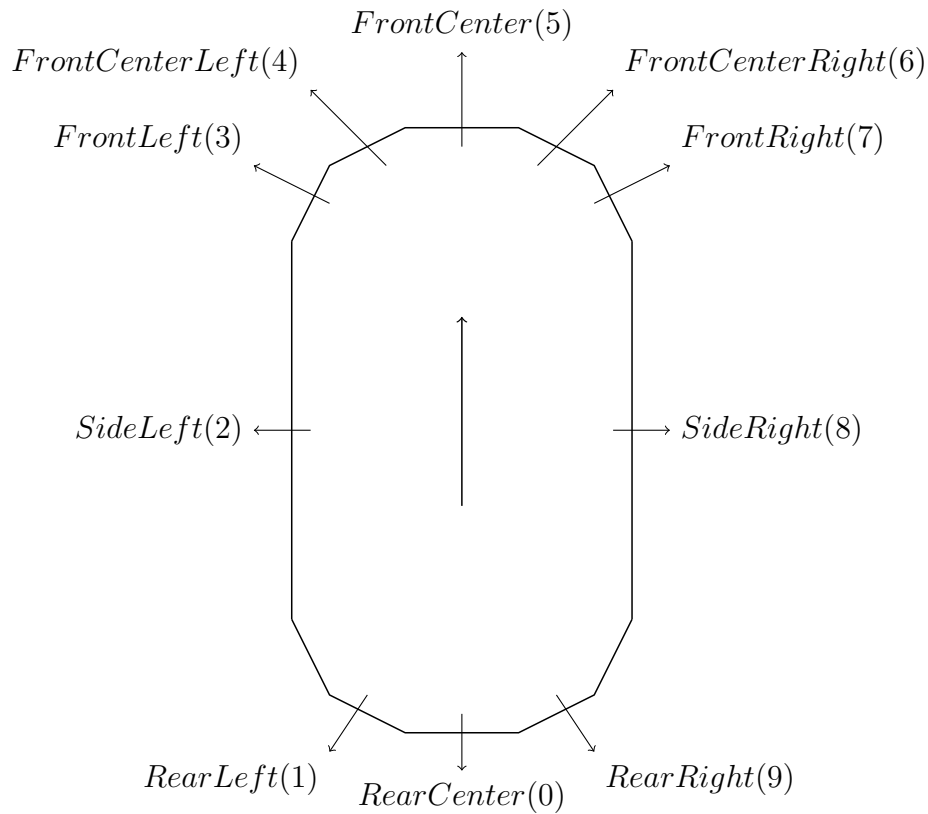


Abbildung 2: Platzierung der Ultraschallsensoren im Modell

vorne, jeweils einer zu jeder Seite und drei, wieder in unterschiedlichen Winkeln, nach hinten ausgerichtet sind. Die drei hinteren Sensoren bekommen nicht so viel Gewichtung, da das Auto in unserem Projekt nicht rückwärts fahren soll.

2.2 Softwareplattform

Das Modellauto verwendet die Ubuntu Version 16.04 und zur Bildschirmübertragung ist der x11vnc Serverdienst eingerichtet. Die Software EB Assist ADTF 2.14 von Elektrobit ist installiert, um die damit bereitgestellte Programmoberfläche und das ADTF-Framework² zu verwenden.

2.2.1 ADTF-Framework: Grundlegende Strukturen

Das Framework stellt Funktionen zur Kommunikation mit den im Abschnitt 'Hardwareplattform' erläuterten Sensoren und Kameras bereit. Außerdem ermöglicht es eine Programmauf-

²Automotive Data and Time-Triggered Framework[2]

teilung in Funktionsblöcke, *Filter* genannt, welche parallel auf mehreren Prozessorkernen ausgeführt werden können. Die Kommunikation zwischen diesen Blöcken wird über Nachrichtenqueues und Priorisierung vom Framework sichergestellt. Die Ausführung der Funktionsblöcke wird einstellbar periodisch eventgesteuert ausgelöst und beginnt meist mit dem Anstoß zum Auslesen der Sensoren, welche dann das Event über die Queues an andere Funktionsblöcke weitergeben.

Von der Benutzeroberfläche aus lassen sich die Funktionsblöcke grafisch miteinander verbinden, welches die Kommunikation zwischen den Blöcken repräsentiert, und die Ausführung der Funktionen starten. Des Weiteren gewährt die Oberfläche Zugriff auf fertige Funktionsblöcke, etwa zum Anzeigen und Abspeichern von Kamerabildern und Sensordaten oder zum Abspielen selbiger. Durch Referenzen aus dem Programm heraus können über die Benutzeroberfläche bestimmte Parameter zur Initialisierung und zur Laufzeit gesetzt werden.

3 Implementierung

3.1 Umgebung

Die Zielsetzung sieht vor, das Auto eine blaue Linie verfolgen zu lassen. Zu Testzwecken wurde daher auf dem Boden eine große, ovalförmige Linienstruktur mit mattblauem Klebeband befestigt, deren Maße etwa 1,5 m x 3 m beträgt. Zur Vermeidung von störender Spiegelung wurde zudem das Fenster zugestellt, um die Sonneneinstrahlung zu minimieren.

TODO: Bild(er) der Umgebung

3.2 Projektstruktur

Das Projekt wurde zu Beginn in verschiedene Aufgabenbereiche aufgeteilt, die separat bearbeitet wurden (siehe Unterabschnitt 1.1). Die vier großen Bereiche sind im Folgenden näher beschrieben.

1. Linienerkennung und -verfolgung
2. Abstandserkennung und -verwertung
3. Motorsteuerung
4. Fusionsschnittstelle

3.2.1 Linienerkennung und -verfolgung

Damit das Auto der blauen Fahrbahnlinie folgen kann, wird die Linie im Kamerabild detektiert. Anschließend wird die Position der Linie ausgewertet, um daraus Steuersignale für die Lenkung zu gewinnen. Diese Aufgaben werden von zwei Filtern gelöst:

BlueImgFilter Dieser Filter markiert die Fahrbahnlinie und greift dafür auf die OpenCV Bibliothek zurück. Die Kamera ist in einem 60 Grad Winkel montiert (Siehe Abbildung 1). Es ist davon auszugehen, dass die Fahrbahnlinie der einzig blaue Bildinhalt im relevanten Bildausschnitt ist. Zunächst wird das Eingangsbild mit OpenCV vom RGB- in den HSV-Farbraum transformiert, um die Festlegung von Ober- und Untergrenzen für Blauwerte zu vereinfachen.

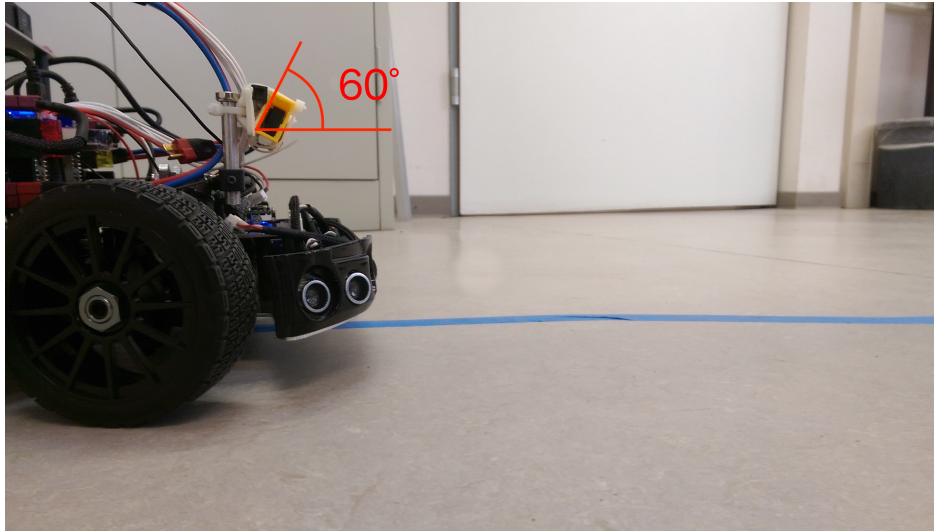


Abbildung 3: Winkel der Frontkamera am Modell

Mittels der OpenCV-Funktion `inRange` werden anschließend alle nicht blauen Bildinhalte herausgefiltert und es wird ein Binärbild zurückgegeben, welches alle blauen Flächen markiert. Die endgültigen Farbwertgrenzen sind das Ergebnis von Versuchen mit variierenden Lichtverhältnissen:

Versuch 1 - Szenario mit geringster Lichtintensität Lichtverhältnisse: Jalousie runtergelassen, Beleuchtung aus, Tageslicht von den Oberlichtern, bewölkt (mittags)

Versuch 2 - Szenario mit höchster Lichtintensität Lichtverhältnisse: Jalousie oben, alle Lichter an, keine Wolken (mittags)

Auswertung:

Das Ergebnis dieser Versuche sind die in Tabelle 1 folgenden Unter- bzw. Obergrenzen der Funktion `inRange()`, welche in beiden Extremfällen eine Positionsberechnung der Linie ermöglichen.

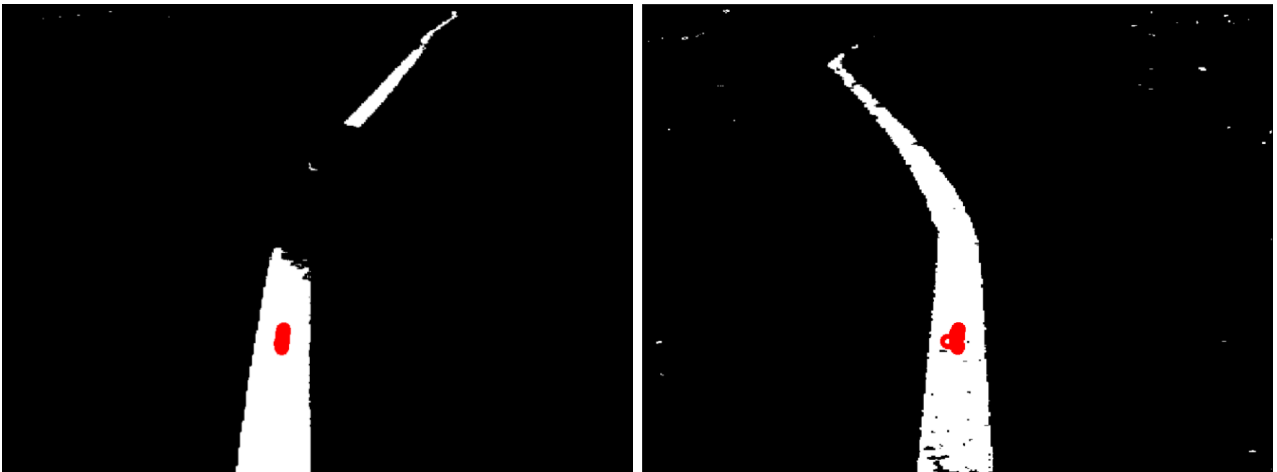
Im dunklen Szenario beeinträchtigt der geringe Rauschabstand die Erkennung der Linie leicht wie auf Abbildung 4 (a) zu erkennen ist. Die Ergebnisse lassen dennoch eine ausreichend robuste Positionsberechnung zu.

Im hellen Szenario ist der Rauschabstand so groß, dass `inRange()` die Fahrbahnmarkierung nahezu optimal ausschneidet. Reflektionen der Sonne können zu Clipping führen und verhindern eine durchgehende Erkennung der Markierung (siehe Abbildung 4 (b)).

h

Tabelle 1: Ergebnisse der Tests bei verschiedener Lichtintensität

	Untergrenze	Obergrenze
Hue	95	130
Saturation	100	255
Value	70	255



(a) Viel Licht und Reflektion

(b) Wenig Licht

Abbildung 4: Gefilterte Linienerkennung unter extremen Lichtverhältnissen

Daher ist es wichtig, direkte Sonneneinstrahlung auf der Fahrbahn zu vermeiden.

OneLineDetect Dieser Filter erhält das Binärbild und ermittelt die Position der blauen Linie relativ zur Position des Autos. Dafür wird in einer Bildzeile kurz unterhalb der Bildmitte (korreliert mit dem Bereich 20 cm vor dem Auto) nach der größten Anzahl weißer, zusammenhängender Pixel gesucht. Der Mittelpunkt wird berechnet und als Zentrum der dort verlaufenden Linie interpretiert. Der Abstand zwischen ermitteltem Linienmittelpunkt und Bildmitte wird auf einen Wert zwischen -100 und 100 normiert und ausgegeben (siehe Abbildung 5).

Um die Berechnung der Linienmitte robuster zu gestalten, was besonders bei verrauschten Kamerabildern in dunklen Lichtverhältnissen nützlich ist, wird die Linienmitte auch in benachbarten Bildzeilen berechnet. Auf die errechneten Linienmittelpunkte wird der Median-Filter angewendet. Außerdem gibt es eine Mindestanzahl an zusammenhängenden weißen Pixeln, die

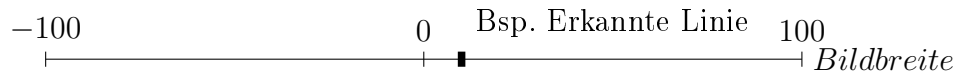


Abbildung 5: Beispiel eines Linienmittelpunktes (10) innerhalb eines Bildes, normiert auf den Bereich -100 bis 100

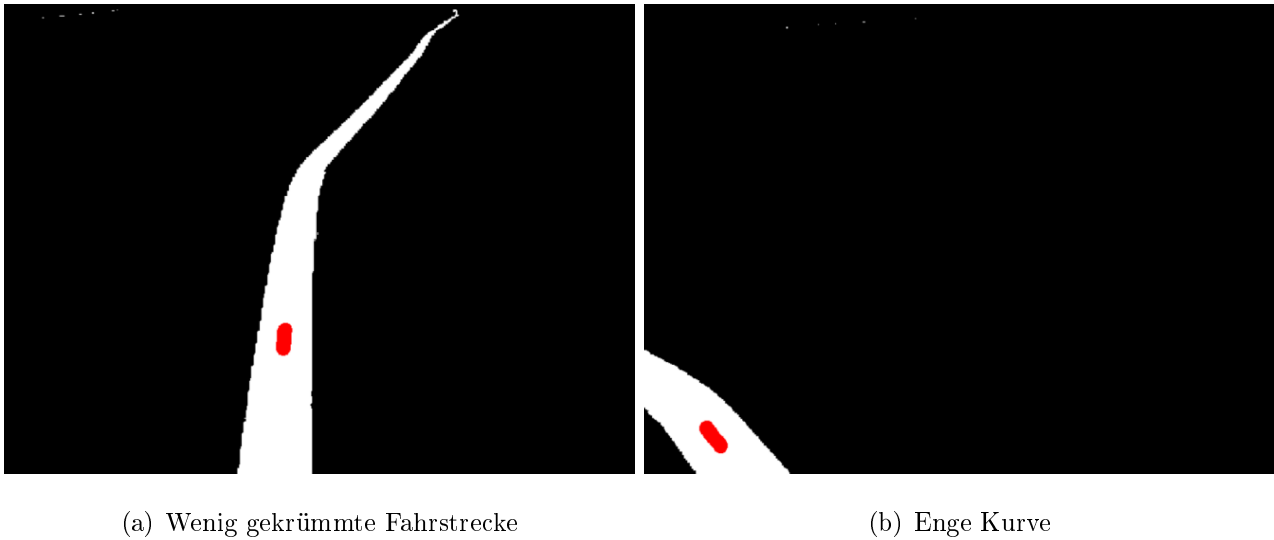


Abbildung 6: Gefilterte Linienerkennung unter normalen Lichtverhältnissen - unterschiedliche Behandlung gemäß Fahrbahnkrümmung

erreicht werden muss, um als Fahrbahnmarkierung zu gelten.

Wird beispielsweise in einer Kurve in dem Bereich unter der Bildmitte keine Linie detektiert, so wird in einem zweiten Suchbereich nahe des unteren Bildrandes gesucht (siehe Abbildung 6 (b)). Dieser Bereich korreliert mit dem Abstand von 5 cm vor dem Auto.

Wird auch hier keine Linie detektiert, wird der Wert -101 ausgegeben.

Auf den Abbildungen 4 und 6 sind in Rot jeweils diejenigen Punkte markiert, die zur Linienpositionierung erkannt wurden.

3.2.2 Abstandserkennung und -verwertung

Die Abstandserkennung ist eine der grundlegenden Anforderungen an einen autonomen Roboter zur Ermöglichung von gefahrloser Navigation. In diesem Projekt wird sie auf Basis von Messwerten der zehn im Auto verbauten Ultraschallsensoren (siehe Abbildung 2) implementiert.

Die eingehenden Abstandswerte liegen im Bereich von 0 bis 400 cm. Diese werden unterschied-

lich gewichtet, dann der geringste Wert in eine Geschwindigkeit umgerechnet. Die Übersetzung eines Abstands- in einen Geschwindigkeitswert wird anhand einer linearen Funktion realisiert, die einen minimalen Input-Grenzwert zum Anstoßen der Bewegung und gleichsam einen maximalen Input-Wert beinhaltet, ab dem die volle Geschwindigkeit zurück gegeben wird (siehe Abbildung 7). Dies dient dazu, einen gewissen Mindestabstand beim Fahren nicht zu unterschreiten, sowie zum Ignorieren von Hindernissen, die weiter als ein gewisser Maximalwert von den Sensoren entfernt aufgefasst werden. Ersterer wurde durch Testergebnisse statisch auf 20 cm gesetzt, letzterer auf 100 cm. Im Abstands-Wertebereich von 20 cm bis 100 cm gilt die lineare Funktion $y = x$.

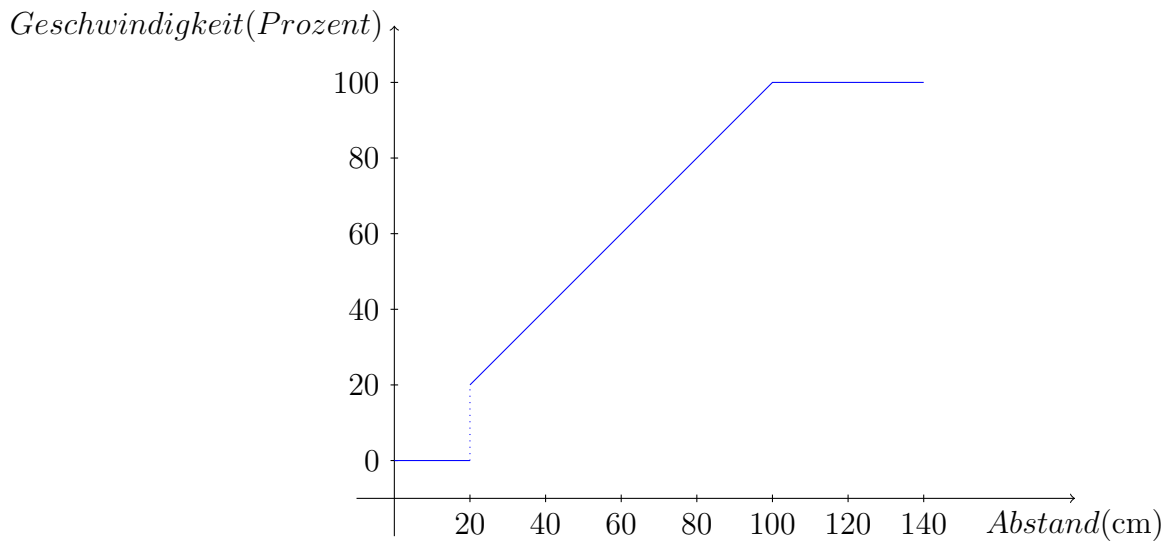


Abbildung 7: Übersetzung von Abstandswert in prozentuale Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit wird mithilfe des kleinsten von allen Ultraschallsensoren gemessenen Abstandswertes berechnet. Da den zur Seite oder gar nach hinten gerichteten Sensoren bei geradliniger Fahrt nicht die selbe Priorität beigemessen werden sollte, wie den nach vorne ausgerichteten, wo der Abstand eher kollisionsrelevant ist, wird zunächst jeder Wert nach Relevanz gewichtet und entsprechend zu einem neuen Wert verrechnet. Mit jedem Sensor wird ein Winkel assoziiert, welcher auf den Bereich zwischen -1 und 1 abgebildet wird, wobei 0 die frontale Ausrichtung beschreibt. Der Bereich von 0 bis -1 beschreibt im Modell den gegen den Uhrzeigersinn gerichteten Halbkreis bis zum nach hinten gerichteten Sensor (Abbildung 2; der Reihe nach die Sensoren (5), (4), (3), (2), (1), (0)) und äquivalent der von 0 bis 1 gehende Bereich den Halbkreis im Uhrzeigersinn zum nach hinten gerichteten Sensor (Abbildung 2; der Reihe nach

die Sensoren (5), (6), (7), (8), (9), (0)). Alle rückgerichteten Sensoren wurden der Einfachheit halber auf 1 respektive -1 abgebildet, da sie bei der normalen Fahrt nicht weiter von Interesse sind. Die Zuordnung der Winkel ist veranschaulicht in Abbildung 8.

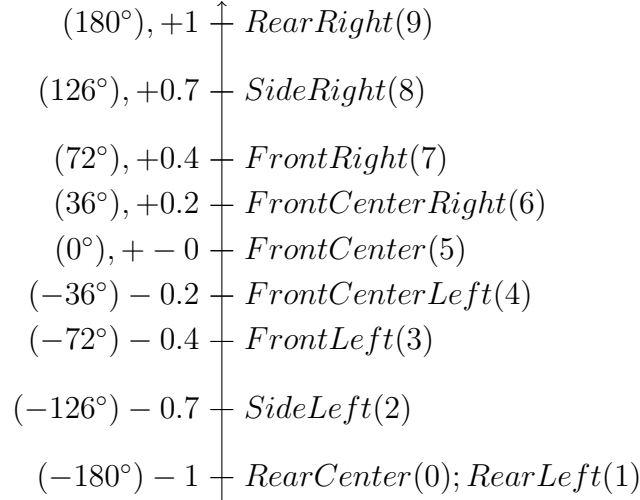


Abbildung 8: Ultraschallsensoren und ihr assoziierter Winkel, projiziert auf den Bereich zwischen -1 und 1

Basierend auf diesen Winkeln wird gemäß einer Gauss-Kurve der Gewichtungsfaktor für den jeweiligen Sensor bestimmt, mit dem dessen Messwert multipliziert wird (dargestellt in Abbildung 9). Dieser Faktor ist stets größer oder gleich 1, was bedeutet, dass ein gemessener Abstand nur zunehmen und damit an Relevanz verlieren kann, wenn es darum geht, im Anschluss den kleinsten zur Geschwindigkeits-Berechnung zu wählen.

Solche statisch festgelegten Gewichtungsfaktoren sind aber vor allem für ein Geradeaus-Fahren mit gewisser Geschwindigkeit optimiert. Das ist beispielsweise in Kurven problematisch, wo das Hauptaugenmerk nicht mehr geradeaus liegen sollte, da die Geschwindigkeit durch links oder rechts verbeifahrend frontal erkannte Hindernisse unnötig gedrosselt werden würde. Daher wurde eine dynamische Anpassung des relevanten Sensor-Blickkegels realisiert. Dazu wird gemäß des eingeschlagenen Lenkwinkels, der dazu auf den Bereich von -1 bis 1 normiert einfließt, die Gauss-Kurve auf der x-Achse verschoben, wie dargestellt in Abbildung 10.

Konkret sieht man in Abbildung 9 und 10 die fixen Ablesepunkte der einzelnen Sensoren auf der x-Achse, welche den Sensor-Winkeln in Blickrichtung des Autos angelehnt wurden. Der entsprechende Punkt auf der Gauss-Kurve gibt den jeweiligen Gewichtungs-Faktor an, wobei ein größerer Wert eine größere Unempfindlichkeit bedeutet. Gemäß Lenkwinkel wird nun die

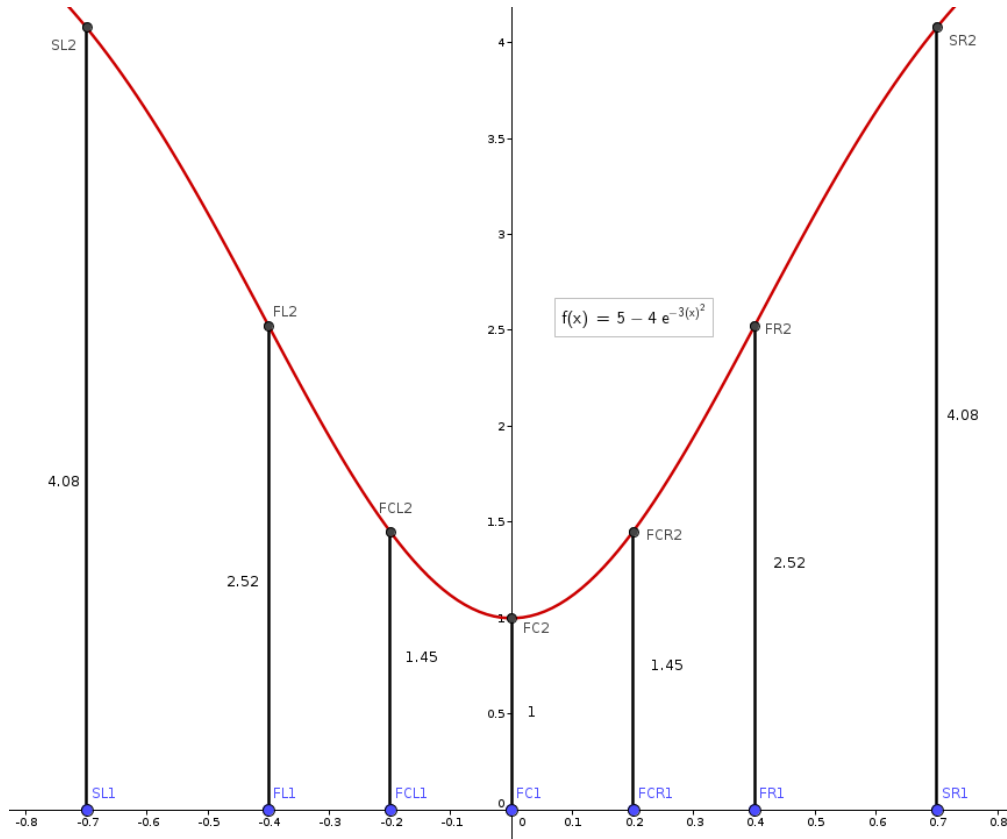


Abbildung 9: Gewichtung der Abstands-Messwerte beim Geradeaus-Fahren

Kurve auf der x-Achse verschoben, wodurch die Gewichtung sich auf die entsprechend seitlich liegenden Sensoren verschiebt.

Die Gauss-Kurve entspricht folgender Formel,

$$sensorWeight = 5 - 4 * \exp\left(-3 * (sensorAngle - steeringAngle)^2\right) \quad (1)$$

wobei *sensorAngle* der auf den Bereich zwischen -1 und 1 normierte Sensorwinkel ist, für den man eine Gewichtung berechnen möchte, und *steeringAngle* der eingeschlagene Lenkwinkel, ebenfalls im Bereich zwischen -1 und 1 liegend. Die Höhe der Kurve, bestimmt durch die addierte 5 sowie die multiplizierte -4, wurden durch Versuche als angemessen herausgestellt und festgelegt.

3.2.3 Motoransteuerung

Die Hauptaufgabe der Motorsteuerung ist das Reagieren auf Flags, wie beispielsweise das Emergencybreak-Flag, sowie das Weitersenden der Motorsteuerungsdaten an die Arduinokom-

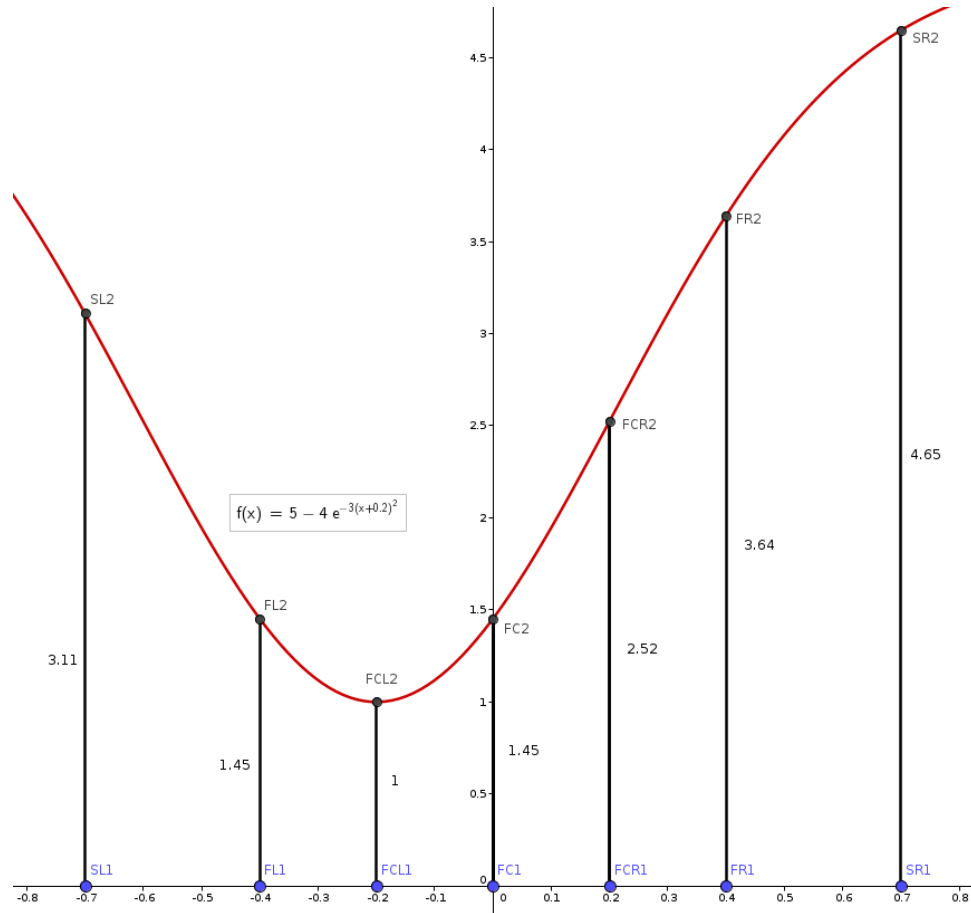


Abbildung 10: Gewichtung der Abstands-Messwerte bei Lenkung nach links (maximale Verschiebung)

munikation, welche sie von dem Controller bekommt.

Wir haben uns entschlossen in diesem Baustein auf Flags zu reagieren, um eine schnellere Reaktion auf kritische Ereignisse, wie zum Beispiel das plötzliche Auftauchen eines Hindernisses zu ermöglichen. Dies erreichen wir, indem wir die Flags direkt aus den Blöcken bekommen, welche die Sensordaten verarbeiten und das Signal nicht erst verschiedene Verarbeitungsschritte durchgehen muss. Die Emergencybreak wird erst wieder aufgehoben, sobald ein entsprechendes Signal von den Sensoren kommt.

Außerdem beherrscht dieser Baustein als einziger das Protokoll, welches zur Ansteuerung der Motoren mittels der Arduinokommunikation verwendet wird. So kann intern ein Protokoll verwendet werden, das sich deutlich besser lesen und im Falle von Verarbeitungsfehlern debuggen lässt. In diesem Protokoll sehen wir vor, dass die Geschwindigkeit als Prozentwert der Maximalgeschwindigkeit gesendet wird. Dieser wird dann, bestimmt durch Tests, auf den Bereich

bis

$$\frac{10}{12}$$

der maximalen Motorgeschwindigkeit umgerechnet, wobei intern die maximal mögliche Geschwindigkeit mit -12 gegeben ist. Da der Motorcontroller eine gewisse Anzahl an Nullen benötigt, um aktiviert zu werden, werden die ersten 150 Geschwindigkeitsdaten auf Null gesetzt. Nach diesen 150 Nullen können dann Geschwindigkeiten an die Motoren gesendet werden.

3.2.4 Fusionsschnittstelle

Interprozesskommunikation

Da die Programmierung in verschiedenen Funktionsblöcken erfolgte, musste eine einheitliche Kommunikation sichergestellt werden. Hierzu wurde eine separate Funktionssammlung erstellt, die von allen Funktionsblöcken inkludiert wurde. Sie beinhaltet Definitionen über den Nachrichtentyp und die Zusammensetzung strukturierter Datentypen. Da der vom ADTF gestellte Ablauf zum Senden oder Empfangen eines bestimmten Nachrichtentyps zur Codeverdopplung in den Funktionsblöcken führen würde, wurden die Funktionen zusammengefasst und ausgelagert. Damit ließ sich auch einheitlich sicherstellen, dass Funktionsblöcke beim Empfangen die Nachricht erst kopierten, bevor deren Inhalt verändert wurde.

3.3 Fallstricke: Komplikationen und Fehler

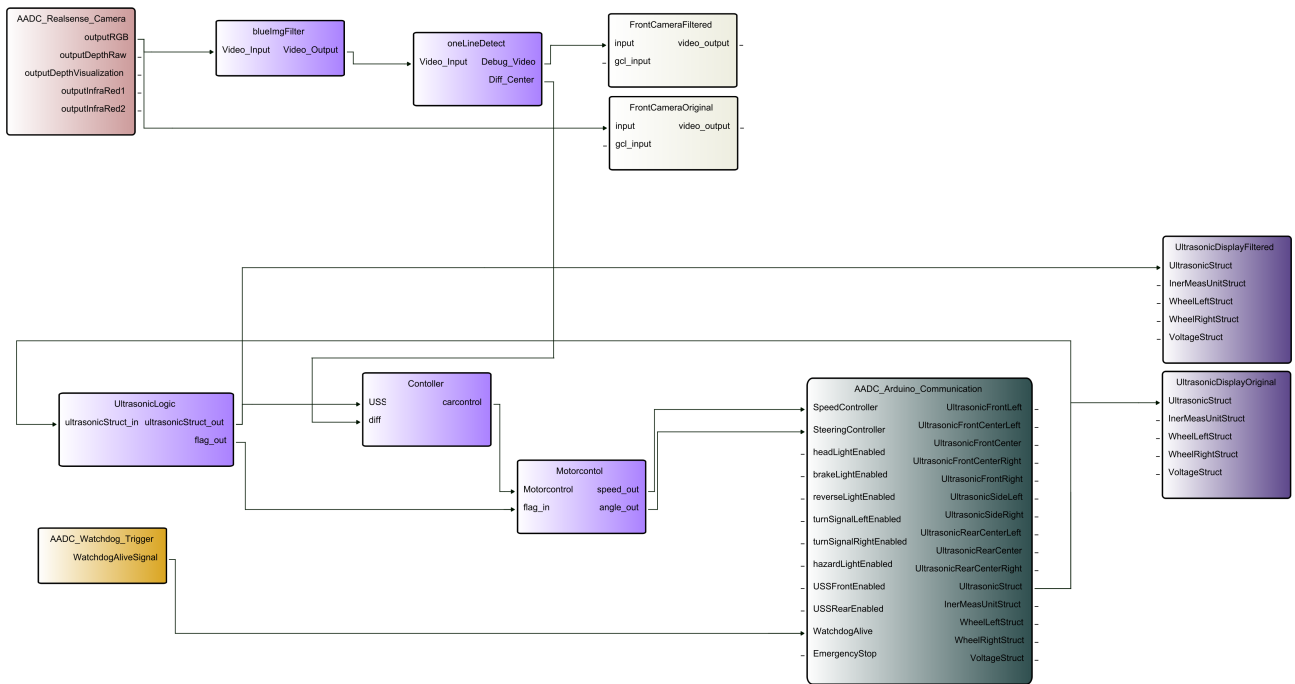


Abbildung 11: Funktionsblockplan der Test-Umgebung

4 Auswertung

Abbildungsverzeichnis

1	Zu Projektbeginn erstellte Roadmap	4
2	Platzierung der Ultraschallsensoren im Modell	6
3	Winkel der Frontkamera am Modell	9
4	Gefilterte Linienerkennung unter extremen Lichtverhältnissen	10
5	Beispiel eines Linienmittelpunktes (10) innerhalb eines Bildes, normiert auf den Bereich -100 bis 100	11
6	Gefilterte Linienerkennung unter normalen Lichtverhältnissen - unterschiedliche Behandlung gemäß Fahrbahnkrümmung	11
7	Übersetzung von Abstandswert in prozentuale Geschwindigkeit	12
8	Ultraschallsensoren und ihr assoziierter Winkel, projiziert auf den Bereich zwischen -1 und 1	13
9	Gewichtung der Abstands-Messwerte beim Geradeaus-Fahren	14
10	Gewichtung der Abstands-Messwerte bei Lenkung nach links (maximale Verschiebung)	15
11	Funktionsblockplan der Test-Umgebung	17

Literatur

- [1] *AADC-Website*, Audi AG: <https://www.audi-autonomous-driving-cup.com/wettbewerb/ueberblick/>
- [2] *ADTF-Website*, Elektrobit: <https://www.elektrobit.com/products/eb-assist/adtf/>
- [3] *Im²C-Geschichte* <https://www.i2c-bus.org/twi-bus/>
- [4] E. Eube, G. Heinrichs, U. Ihlefeldt, *Im²C-Bussystem*, Fortbildungsveranstaltung in Mönchengladbach, 23.08.2008: <http://www.g-heinrichs.de/pdv/i2c.pdf>
- [5] *Im²C-Bussystem*, Robot Electronics: <http://www.robot-electronics.co.uk/i2c-tutorial>