

SEMINARARBEIT

Rahmenthema des Wissenschaftspropädeutischen Seminars:

Fahrzeugtechnik

Leitfach: *Physik*

Thema der Arbeit:

Bau eines autonom fahrenden Fahrzeugs mit Hilfe von Arduino

Verfasser:
Jakob Volkmer

Kursleiter:
StR Farca

Abgabetermin: 06.11.2018

| Bewertung | Note | Notenstufe in Worten | Punkte | | Punkte |
|---|------|----------------------|--------|-----|--------|
| Schriftliche Arbeit | | | | x 3 | |
| Abschlusspräsentation | | | | x 1 | |
| Summe: | | | | | |
| Gesamtleistung nach § 61 (7) GSO = Summe : 2 (gerundet) | | | | | |

Datum und Unterschrift der Kursleiterin bzw. des Kursleiters

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| 1. AUTONOMES FAHREN HEUTE | 3 |
| 2. TECHNISCHE REALISIERUNG | 4 |
| 2.1. Sensoren an autonom fahrenden Autos..... | 4 |
| 2.1.1. Kameras für autonomes Fahren..... | 4 |
| 2.1.2. GPS für autonome Navigation | 6 |
| 2.1.3. Lidar Systeme – Laserscanner für Autos | 8 |
| 3. DAS AUTONOM FAHRENDE FAHRZEUG „VOLKMER-WAGEN“ | 10 |
| 3.1. Ablauf des Erstellungsprozesses..... | 11 |
| 3.2. Hardware des Fahrzeugs..... | 12 |
| 3.2.1. Steuerung mit dem Arduino kompatiblen Board Mega 2560 PRO | 12 |
| 3.2.2. Kommunikation mit dem HC-06 Bluetooth Modul | 13 |
| 3.2.3. Antrieb mit modifizierten MG90 Servomotoren..... | 13 |
| 3.2.4. Fortbewegung mit Mecanum Rädern | 15 |
| 3.2.5. Die 3D-gedruckte Fahrzeugkarosserie..... | 16 |
| 3.2.6. Sensoren des Fahrzeuges | 17 |
| 3.2.6.1. Ultraschall Entfernungssensor HC-SR04..... | 17 |
| 3.2.6.2. Infrarotsensor QRE1113 zur Linienerkennung..... | 18 |
| 3.2.6.3. Beschleunigungssensor MPU6050 und Gyroskop 6-DOF IMU | 19 |
| 3.3. Software des autonom fahrenden Fahrzeugs..... | 20 |
| 3.3.1. Arduino Sketch..... | 20 |
| 3.3.2. Android-App mit Processing..... | 22 |
| 4. FAHRBETRIEB DES „VOLKMER-WAGENS“ IN DER REALITÄT | 23 |
| 4.1. Fortbewegung auf einer Testumgebung..... | 23 |
| 4.2. Reaktion auf Hindernisse und äußere Faktoren | 24 |
| 5. FAZIT ZUM PROJEKT „VOLKMER-WAGEN“ | 24 |
| 6. ANHANG: | 26 |
| 6.1 Literaturverzeichnis | 26 |
| 6.2 Abbildungsverzeichnis..... | 29 |
| 6.3 Anlage | 30 |
| 6.4 Erklärung | 30 |

1. AUTONOMES FAHREN HEUTE

Neben der Elektromobilität ist das autonome Fahren eines der großen Themen weltweit in der Automobilbranche. Die amerikanische Vereinigung für Standardisierung (SAE) hat das autonome Fahren dafür in fünf Stufen eingeteilt. Bei den Stufen eins und zwei spricht man von assistiertem Fahren, bei dem der Fahrer ständig sein Fahrzeug beherrschen muss. Die Stufen drei und vier kann man als automatisiertes Fahren bezeichnen, bei der sich der Fahrer vom Verkehrsgeschehen abwenden darf und nur bei Aufforderung des Fahrzeuges eingreifen muss. Wobei der Fahrer in der vierten Stufe die Fahrzeugführung schon komplett abgeben darf. Erst bei der fünften Stufe wird von autonomen Fahren gesprochen, bei der kein Fahrer mehr benötigt wird.¹ Dabei gehen die Regierungen der Länder unterschiedlich mit dem Thema um. In Deutschland sind bisher nur Stufe eins und zwei erlaubt. Im Laufe der nächsten Jahre soll das autonome Fahren nur langsam Stufe für Stufe legalisiert werden. Mit einer speziellen Lizenz ist dagegen in Kalifornien Stufe fünf, das fahrerlose Fahren, seit April 2018 erlaubt.² Die Chinesische Regierung verfolgt die Strategie, dass 2030 „Roboterautos zur Norm werden“³ sollen. Doch auch in Deutschland nehmen, laut der Global Automotive Consumer Study Sicherheitsbedenken im Bezug auf autonome Mobilität deutlich ab - „nannten in der Studie 2017 noch 72 Prozent der Befragten Sicherheitsbedenken, sind es nunmehr 45 Prozent“.⁴ Die Autohersteller sind sich dagegen nicht einig, was das beste Modell zur Autonomisierung von Fahrzeugen ist. Während Audi, Mercedes und BMW an dem deutschen Modell festhalten und in der Zukunft Fahrzeuge der dritten Stufe entwickeln, sehen das Hersteller wie Volvo und Ford als zu gefährlich an und wollen direkt auf die vierte Stufe springen. Volvo zum Beispiel hat Bedenken, dass der Mensch in einer brenzligen Situation nicht schnell genug die richtige Entscheidung treffen kann, wenn er abgelenkt ist. Deshalb will Volvo direkt ein Auto der vierten Stufe entwickeln, um dem Fahrzeug die komplette Verantwortung zu übergeben. Amerikanische Konkurrenten, wie Waymo, gehen noch einen Schritt weiter, indem sie komplett autonome Fahrzeuge entwickeln. Auch in der Versuchsanordnung im Rahmen dieser Seminararbeit wird der Schwerpunkt auf das autonome Fahren der Stufe fünf gelegt, da das konstruierte Modellfahrzeug komplett autonom fahren soll.

¹ @1

² @24

³ @14

⁴ @9

2. TECHNISCHE REALISIERUNG

Für die Entwicklung autonomer Fahrzeuge spielt die Software eine wichtige Rolle. Komplexe Entscheidungen im Straßenverkehr zu fällen, sowie unterschiedliche Verkehrsregeln in verschiedenen Ländern zu beachten, sind oft gar nicht mehr mit herkömmlicher Programmierung zu lösen. Dafür werden neben einer großen Menge an Daten dann sogenannte „*machine learning*“ Algorithmen gebraucht. „Eine besondere Eigenschaft dieser Algorithmen ist die automatische, auf Erfahrungen basierende Verbesserung des technischen Systems.“⁵ Das Model 3 von Tesla befindet sich zum Beispiel im normalen Fahrbetrieb im sogenannten „*Schatten-Modus*“, in welchem das System selbständig aus Entscheidungen des Fahrers dazulernt, um diese gewonnenen Erkenntnisse dann später im autonomen Fahrbetrieb anzuwenden.⁶ Doch einen viel größeren Sprung hat die Hardware im Bau von autonomen Fahrzeugen gemacht. So werden heutzutage viel mehr und bessere Sensoren verbaut. Die nächste Generation der Tesla Modelle werden zum Beispiel statt einer Kamera acht Kameras rund ums das Fahrzeug verteilt haben.⁷ Auch hat sich in den letzten Jahren die Rechenleistung der Computer vervielfacht, was bei autonomen Fahrzeugen eine Echtzeitauswertung von Sensordaten, sowie die Reaktion auf diese, ermöglicht.⁸

2.1. Sensoren an autonom fahrenden Autos

Sensoren sind die Schnittstellen autonom fahrender Fahrzeuge zur Außenwelt. Sie müssen die visuelle, taktile und auditive Sinneswahrnehmung des Menschen verlässlich ersetzen können. Damit ein Auto zuverlässig autonom fahren kann, ist zu jedem Zeitpunkt ein Bild des Straßengeschehens rund um das Auto notwendig. Für ein Erfassen des Geschehens rund um das Fahrzeug benötigt man aber nicht nur Kameras, sondern noch viele weitere Sensoren, die im Folgenden näher beschrieben werden.

2.1.1. Kameras für autonomes Fahren

Kameras sind die Augen des Autos und damit wichtige Bestandteile eines autonomen Fahrzeugs. Diese müssen nicht besonders hochauflösend sein oder schöne Bilder machen können, sondern müssen schnell, lichtstark und verlässlich sein. Um die Lichtstärke bzw. Lichtempfindlichkeit zu verbessern, wird die Pixelgröße erhöht, damit jeder Pixel mehr Licht

⁵ Mau15, S.468

⁶ @22

⁷ @29

⁸ @2

absorbieren kann. Daraus folgt dann eine niedrigere Auflösung, die aber unproblematisch für die Auswertung ist.⁹ Außerdem werden CMOS Sensoren (Complementary metal-oxide-semiconductor) verwendet, die man auch als aktive Sensoren bezeichnet. Im Gegensatz zu den passiven, ist bei den aktiven Sensoren in jedem Pixel ein kleiner Verstärker verbaut, welcher den Strom aus den Fotodioden direkt verstärkt.¹⁰ Dies führt dann zu einer deutlich höheren Verarbeitungsgeschwindigkeit, welche bei autonom fahrenden Autos wichtig ist, um Reaktionszeiten zu verkürzen.

Wie für die Erstellung von 3D-Kinofilmen, kommen auch im Fahrzeugbau Stereokameras zum Einsatz. Diese sind eigentlich zwei getrennt funktionierende Kameras, die in einem festen Abstand zueinander verbaut sind. Mit ihnen kann neben der Geometrie der Hindernisse, auch die grobe Entfernung zu ihnen wahrgenommen werden.¹¹

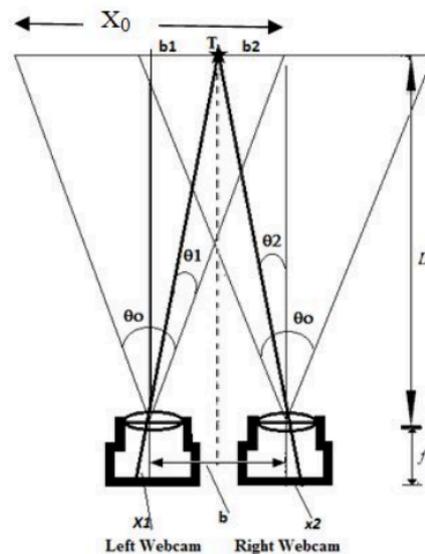


Abbildung 1: Stereokameras

Diese Skizze zeigt zwei Kameras mit gleicher Fokallänge (f), sowie den gleichen Bildwinkel (θ_0). Um die Entfernung (D) zu dem Objekt (T) zu ermitteln, dürfen nur Variablen verwendet werden, die über die zwei 2D-Bilder der Kameras zu erfassen sind. Man benötigt für die Berechnung die Fokallänge, den Abstand der beiden Kameras (b) und die Abstände des Hindernisses zur Mitte auf den Sensoren (x_1 und x_2).¹²

⁹ @30

¹⁰ @7

¹¹ @32

¹² @15

$$\frac{b_1}{D} = \frac{-x_1}{f} \text{ und } \frac{b_2}{D} = \frac{x_2}{f}$$

Da $b = b_1 + b_2$ ist gilt:

$$b = \frac{D}{f}(x_2 - x_1)$$

Daraus resultiert die Entfernung (D) zum Objekt:

$$D = \frac{bf}{x_2 - x_1}$$

Der Nachteil an dieser kamerabasierten Entfernungsbestimmung von Hindernissen ist, dass diese in großer Entfernung ungenau wird.¹³ Gleichzeitig benötigt sie auch viel Rechenleistung, da pro Bild an vielen Hindernissen gleichzeitig die Entfernung berechnet werden muss. Auch sind diese Kameras bei Dunkelheit ungenau und können falsche Ergebnisse bei stark variierenden Lichtverhältnissen liefern. Außerdem ist diese Methode unbrauchbar, wenn die Kameras zum Beispiel durch Schnee oder Dreck verdeckt werden.¹⁴ Trotz dieser Nachteile werden immer mehr Kameras bei selbstfahrenden Autos rund um das Fahrzeug verbaut. Um zum Beispiel Unschärfeproblematiken zu umgehen, werden oft mehrere Kameras mit verschiedene Brennweiten für verschiedene Distanzen verbaut. So kommen beim Model 3 von Tesla allein drei Kameras nach vorne gerichtet zum Einsatz: ein Weitwinkel für den Nahbereich, eine Normalbrennweite für die mittlere Distanz und ein Teleobjektiv für lange Distanzen. Damit werden die Hindernisse frühzeitig erkannt und gleichzeitig im Nahbereich eine ausreichende Schärfe für die Objekterkennung per Software geliefert. Die Software muss dann in Echtzeit die einzelnen Bilder nach Straßenverlauf, Verkehrsschildern und anderen Verkehrsteilnehmern oder Hindernissen auswerten.

2.1.2. GPS für autonome Navigation

Das Global Positioning System (GPS) ist ein ursprünglich für das amerikanische Militär gebautes System, um die Position eines Objekts auf der Erde anhand von Satelliten festzustellen. Später wurde das System dann für die zivile Bevölkerung geöffnet, wenn auch zuerst künstlich verfälscht. Grund dafür war, dass die Positionsdaten für andere nicht genau so gut sein sollten wie die für das Militär. „GPS besteht aus einem Verbund von 24 Satelliten, die die Erde in elliptischen (nahezu kreisförmigen) Bahnen in ca. 20200 km Höhe umrunden.

¹³ @17

¹⁴ @23

Dabei bewegen sich je vier Satelliten auf sechs unterschiedlichen Bahnebenen, die um 55° gegen die Äquatorebene geneigt und gegeneinander um 60° versetzt sind¹⁵. Die Voraussetzung für die Bestimmung der Position ist, dass sich mindestens vier GPS-Satelliten in Reichweite zum Empfänger befinden müssen. Zusätzlich werden Bodenstationen und geostationäre Satelliten benötigt, die Korrektursignale senden. Die GPS-Satelliten senden in einem bestimmten Zeitintervall Datenpakete, die die Sendezeit und Position des Satelliten beinhalten. Aus der Zeitdifferenz ($\Delta t = t_2 - t_1$) und der Lichtgeschwindigkeit ($c = 299\,792\,458 \frac{m}{s}$) kann dann die Entfernung (s) zu diesem Satelliten berechnet werden.

$$\Delta s = \Delta t \cdot c$$

Bei der Abfrage von nur einem Satelliten kann sich das GPS-Gerät auf einer bestimmten Kugeloberfläche um den Satelliten befinden. Bei zwei Satelliten schneiden sich die zwei Kugeloberflächen in Form eines Kreises. Bei drei Satelliten kann der GPS-Empfänger dann nur noch auf zwei Punkten liegen. Wenn ein vierter Satellit dazu kommt, kann die Position eindeutig berechnet werden. Doch in der Realität ist das nicht ganz so einfach wie hier beschrieben, da die Zeitdifferenzen, aus denen die Abstände zu den Satelliten berechnet werden, oft nicht ausreichend genau sind. Eine Abweichung der Zeitdifferenz um eine tausendstel Sekunde würde zum Beispiel einen Distanzfehler von 300km verursachen. Deshalb wird, wenn möglich, mit mehr als vier Satelliten gearbeitet, um so auf eine Genauigkeit von 5-10m zu kommen.¹⁶ Außerdem müssen Effekte der Relativitätstheorie berücksichtigt werden. Da die Zeit, der sich mit $3,9 \frac{km}{s}$ bewegenden Satelliten, gedehnt wird, entstehen weitere Zeitungenauigkeiten.

In autonomen Fahrzeugen werden, wie bei herkömmlichen Autos auch, GPS-Geräte für die Navigation benötigt. Der Unterschied ist aber, dass heutzutage im Notfall der Mensch noch in die Navigation eingreifen kann, im Gegensatz zu fahrerlosen Fahrzeugen. So wirft das System zur Zeit noch Probleme auf, da das GPS zwar eigentlich auf der ganzen Welt verfügbar ist, es aber zum Beispiel in langen Tunneln oder in engen Tälern trotzdem zu einem Kommunikationsabbruch kommen kann. In diesem Fall wüsste das Auto nicht mehr, wo es sich aktuell befindet und kann demzufolge auch nicht entscheiden, wo es zum Beispiel abbiegen soll. Deshalb sind zur Zeit neue Systeme in der Entwicklung wie das GALILEO System der EU, welches mit neuerer Technik und mehr Satelliten eine bessere Verfügbarkeit

¹⁵ @12

¹⁶ @21

sowie eine Genauigkeit von bis zu 10cm verspricht. Jedoch wird diese Genauigkeit nur den zahlenden Nutzern („Commercial Service“) vorbehalten. Der „Open Service“ soll für alle kostenlos verfügbar sein und immerhin eine Genauigkeit von 4m haben.¹⁷

2.1.3. Lidar Systeme – Laserscanner für Autos

Light detection and ranging, kurz Lidar-Systeme, können 360° um sich herum ihr Umfeld und die Entfernung sowie die Reflexion der Hindernisse wahrnehmen. Lidar-Systeme bestehen aus einer Laserdiode mit Ablenkspiegel und einer Multispektralkamera (ebenfalls mit Ablenkspiegel), die Licht auch im Infrarotbereich verarbeiten kann. Diese Apparatur befindet sich auf einem Drehteller mit einem Motor, der sich schnell um die eigene Achse dreht.¹⁸ Während sich die Plattform dreht, wird der Laserstrahl durch ein System von Drehspiegeln in die vertikale Ebene abgelenkt. Die Distanz des gemessenen Objekts zu dem Sensor kann entweder über Triangulation mit Hilfe von den Drehwinkeln der Ablenkspiegel berechnet werden oder über die Zeitdifferenz vom Aussenden des Lasers bis zum Eintreffen auf den Sensor.

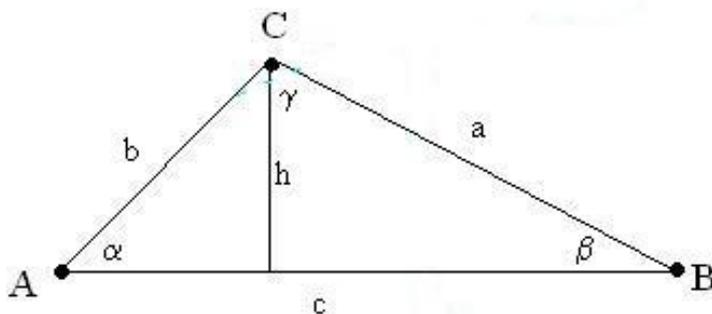


Abbildung 2: Triangulation

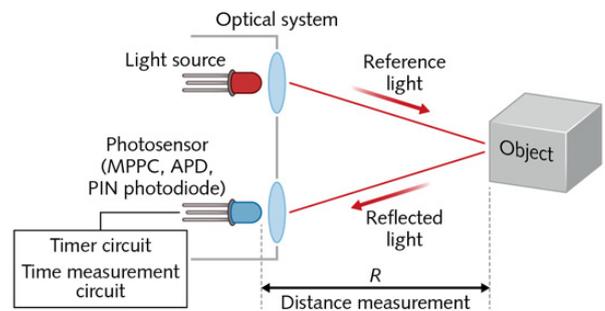


Abbildung 3: Laufzeitmethode

In Abbildung 2 ist die Distanzbestimmung mit Hilfe von Triangulation dargestellt. Der Punkt A soll der Laser, B der Empfänger und C das zu messende Objekt sein. Die bekannten Größen sind der Abstand zwischen Laser und Empfänger (c), der Drehwinkel des Lasers (α) und der Drehwinkel des Empfängers (β).

¹⁷ @13

¹⁸ @20

$$h = a \cdot \sin(\beta) \quad \text{und} \quad a = c \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\gamma)}$$

$$\text{daraus folgt: } h = c \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(180-(\alpha+\beta))} \cdot \sin(\beta)$$

Dieses Verfahren ist im Gegensatz zur Laufzeitmethode nur bei kürzeren Distanzen ausreichend genau. Bei der Laufzeitmethode (Abbildung 3) werden viele kurze Laserimpulse erzeugt, die dann zum Objekt übertragen, dort reflektiert werden und beim Empfänger wieder ankommen. Den Mittelwert dieser Zeitdifferenz (Δt) multipliziert man mit der Lichtgeschwindigkeit ($c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$).

$$\Delta s = \Delta t \cdot c$$

Da immer der Mittelwert zwischen verschiedenen Messergebnissen gebildet wird, ist dieses Verfahren auch noch bei längeren Distanzen relativ genau. Zusätzlich wird die Stärke des reflektierten Laserstrahls gemessen, d. h. es wird ermittelt, welcher Strahlungsanteil vom Objekt absorbiert bzw. reflektiert wurde. Damit kann eine sogenannte Falschfarbendarstellung des Objektes erfolgen, da die unterschiedlichen Objektmaterialien die Laserstrahlung auch unterschiedlich stark reflektieren.¹⁹



Abbildung 4: Messungen eines Lidarsystems

¹⁹ Ger15, S.338

In Abbildung 4 ist oben im Bild die Falschfarbendarstellung zu sehen, die einem Schwarz-Weiß-Foto ähnelt, aber nicht direkt den echten Farben der Objekte entsprechen. Im unteren Bild ist die Darstellung der Distanzen visualisiert, die sich wie oben beschrieben berechnen.²⁰ Die Eigenschaften der Lidar-Systeme sind sehr wichtig für autonomes Fahren, da sie anders als Ultraschallsensoren nicht nur Entfernungen messen können, sondern sich zusätzlich wie Kameras ein Bild von der Umgebung machen. Dadurch kann jedem Objekt auf dem Bild direkt eine Entfernung zugewiesen werden. Außerdem sind Lidar-Systeme, im Gegensatz zu Kameras nicht lichtabhängig und funktionieren somit auch bei kompletter Dunkelheit. Das beschriebene Lidar-System bezeichnet man auch als „Rotating Laser“ System, da, wie der Name schon sagt, sich der Laser dreht. Diese Systeme werden heutzutage vorwiegend eingesetzt. Doch sie sind relativ groß und teuer. Außerdem können sie durch die vielen beweglichen Teile über die Zeit fehleranfällig werden. Deswegen wird aktuell an „Solid State“ Systemen geforscht, die keine beweglichen Teile haben sollen und deswegen auch günstiger in der Produktion sein werden.²¹ Diese Systeme haben zwar keinen 360° Rundumblick, sondern einen Blickwinkel vergleichbar mit einer Kamera. Die Vorteile an diesen Systemen sind aber, dass sie leichter einzubauen sind und einen geringeren Verschleiß haben. „Die vom Laser gesendeten und vom Objekt [...] reflektierten Lichtstrahlen sollen durch einen speziellen Sensor erkannt werden. Diese Detektoren müssen extrem empfindlich und in der Lage sein, einzelne Photonen zu messen.“²² Ob und wann diese „Solid State“ Systeme zum Einsatz kommen werden, ist noch unklar.²³

3. DAS AUTONOM FAHRENDE FAHRZEUG „VOLKMER-WAGEN“

Der sogenannte „Volkmer-Wagen“ ist ein mit einem Mikrokontroller gesteuertes Fahrzeug, das sich autonom auf einer Teststrecke bewegen kann. Bedient wird das Auto mit einer Android-App, die über Bluetooth mit dem Mikrokontroller im Auto kommuniziert. Das Fahrzeug kann mithilfe der App in zwei Modi betrieben werden. Der erste Modus funktioniert dabei wie eine normale Fernsteuerung. Im zweiten Modus kann der „Volkmer-Wagen“ autonom betrieben werden. Versucht wurde ein realistisches Szenario zu simulieren: Ein Passagier steht an einem Punkt in der Stadt und möchte von seinem Auto abgeholt werden, welches sich an der Ladestation befindet. Es soll selbständig zum Passagier fahren, ihn dort

²⁰ @19

²¹ @3

²² @27

²³ @10

abholen und ihn danach zum gewünschten Ziel bringen. Anschließend soll das Auto wieder zur Ladestation zurück fahren. Dieses Szenario wurde auf einem ca. vier Quadratmeter großen Parcours nachgebaut. Das Auto selber hat die Maße 11,5cm x 17cm. Die möglichen Start- und Zielpunkte wurden als verschiedenfarbige Häuser angelegt.

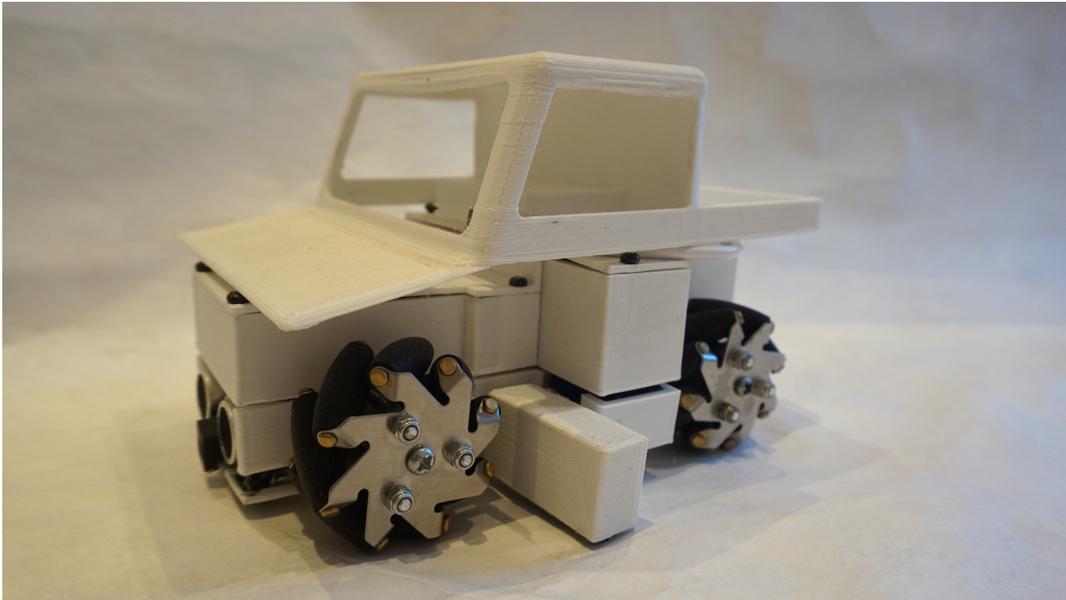


Abbildung 5: Der „Volkmer-Wagen“

3.1. Ablauf des Erstellungsprozesses

Der Bau des „Volkmer-Wagens“ zog sich insgesamt über ein halbes Jahr hin. Zuerst wurde das Auto an sich gebaut, danach wurden die einzelnen Komponenten getestet. Während dieser Testphase stellte sich zum Beispiel heraus, dass die Ansteuerung der ursprünglich eingebauten Getriebemotoren zu ungenau war. Sie mussten deshalb durch Servomotoren ersetzt werden. Aufgrund der neuen Bauform der Motoren war es wiederum notwendig das gesamte Design des Autos zu verändern und neu am 3D Drucker auszudrucken. Nach dem Zusammenbau aller Komponenten wurde die Android-App in Processing programmiert. Anschließend wurde die Teststrecke in einem Bauwagen aufgebaut. Als Fahrbahnuntergrund entschied man sich für einen weißen Fotohintergrund, auf dem mit schwarzen Klebeband Fahrbahnmarkierungen und Stoppllinien aufgebracht wurden. Die Häuser sind Quader aus Holz, die mit weißem Papier umspannt sind. Zuletzt wurde der Arduino Sketch mit der Logik für das autonome Fahren geschrieben.

3.2. Hardware des Fahrzeugs

Das Innenleben des Autos besteht, in Relation zur Baugröße, aus vielen Einzelkomponenten. Insgesamt sind fünf Servomotoren verbaut, wobei vier für den eigentlichen Antrieb genutzt werden. Ein weiterer klappt ein Modul mit Sensoren aus, welches die Fahrbahnbegrenzung analysiert. In diesem Modul befinden sich drei Infrarotsensoren, die weißen von schwarzem Untergrund unterscheiden können. Zusätzlich sind im Frontbereich des Fahrzeugs zwei Infrarotsensoren angebracht um Haltelinien zu erkennen. Zwei Ultraschallsensoren, der eine nach vorne, der andere nach hinten gerichtet, messen die Entfernung zu anderen Objekten. Auf diese Weise können Hindernisse, Häuser, sowie die Außenbegrenzung des Parcours erkannt werden. Zusätzlich ist ein Gyroskop und ein Beschleunigungssensor verbaut, um den genauen Drehwinkel des Autos zu bestimmen. Alle Komponenten werden mit einem Arduino kompatiblen Mikrokontroller gesteuert beziehungsweise ausgelesen. An der Hauptplatine, die vom Mikrokontroller gesteuert wird, können zusätzlich noch zwei Taster und ein adressierbarer LED Strip angebaut werden. Außerdem sind im Auto noch eine Induktionsspule, ein Lithium-Polymer-Akku (7,4V 500mAh) samt Ladeplatine, sowie drei Spannungsregler verbaut.

3.2.1. Steuerung mit dem Arduino kompatiblen Board Mega 2560 PRO

Das Mega 2560 PRO ist eine für Arduino programmierbare Platine ähnlich dem Arduino Mega, nur wesentlich kleiner. Auf der Platine befindet sich ein ATmega2560 Mikrokontroller, mit einer Taktfrequenz von 16MHz, einem Flash-Speicher von 256KB und einem Arbeitsspeicher von 8KB. Die Platine hat 53 digitale Ein- und Ausgänge, die zwei Zustände lesen bzw. schreiben können.²⁴ Außerdem befinden sich auf der Platine 16 analoge Eingänge, die Spannungen bis 5V in jeweils 1024 Schritten messen können. Programmiert wird der Mikrokontroller mit einer integrierten Entwicklungsumgebung, Arduino IDE. Obwohl die Platine eine kleine Baugröße aufweist, ist trotzdem ein USB-TTL Wandler integriert, womit das Übertragen des Codes mithilfe eines gewöhnlichen USB-Kabels möglich ist. Das MEGA 2560 PRO ist auf eine Lochrasterplatine (der Hauptplatine) aufgesteckt, auf der sich auch das Bluetooth Modul, das Gyroskop, zwei Spannungsregler und die Buchsen für die anderen Komponenten befinden (siehe Skizze im Anhang).

²⁴ @26

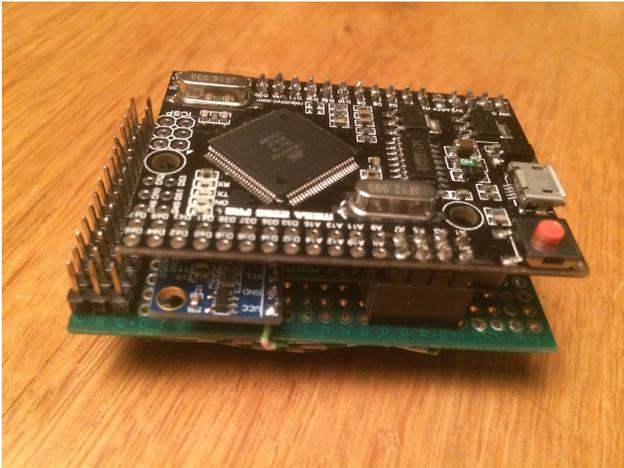


Abbildung 6: Hauptplatine oben

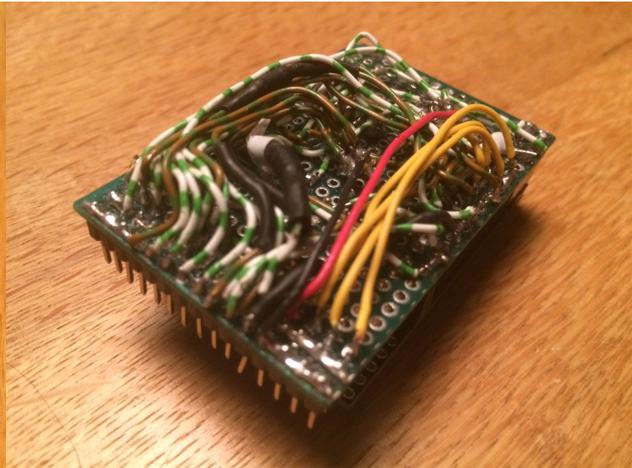


Abbildung 7: Hauptplatine unten

3.2.2. Kommunikation mit dem HC-06 Bluetooth Modul

Für die Verbindung mit einem Smartphone wird ein Bluetooth Modul genutzt, um das Auto über die App zu steuern. Das HC-06 Modul unterstützt ein Bluetooth Protokoll der Version 2.0 und besitzt eine 2.4 GHz Antenne.²⁵ Dieses Bauteil läuft im sogenannten „Slave Modus“. Dies bedeutet, dass es nicht aktiv eine Verbindung aufnehmen kann, sondern darauf wartet, dass sich der Master - in dem Fall das Handy - mit dem Modul verbindet.²⁶ Das Modul wird also nicht automatisch mit dem Smartphone verbunden, sondern muss durch den Nutzer bewusst ausgewählt werden. Im Betrieb werden alle 100 Millisekunden die Eingaben des Benutzers empfangen und danach die Daten der Sensoren zurückgesendet.

3.2.3. Antrieb mit modifizierten MG90 Servomotoren

Modellbau-Servomotoren haben eine eingebaute Motorsteuerung, ein Getriebe und ein Potentiometer, das die Position der Achse erfasst. Dadurch kann ein Servomotor auf eine bestimmte Position drehen und dort stehen bleiben oder sich selbst korrigieren. Wie bei Servomotoren üblich, wird durch das Potentiometer und einem Anschlag im Getriebe der Spielraum des Motors eingeschränkt. Für die Fortbewegung des Autos müssen die Motoren jedoch kontinuierlich drehen können.

²⁵ @31

²⁶ @4

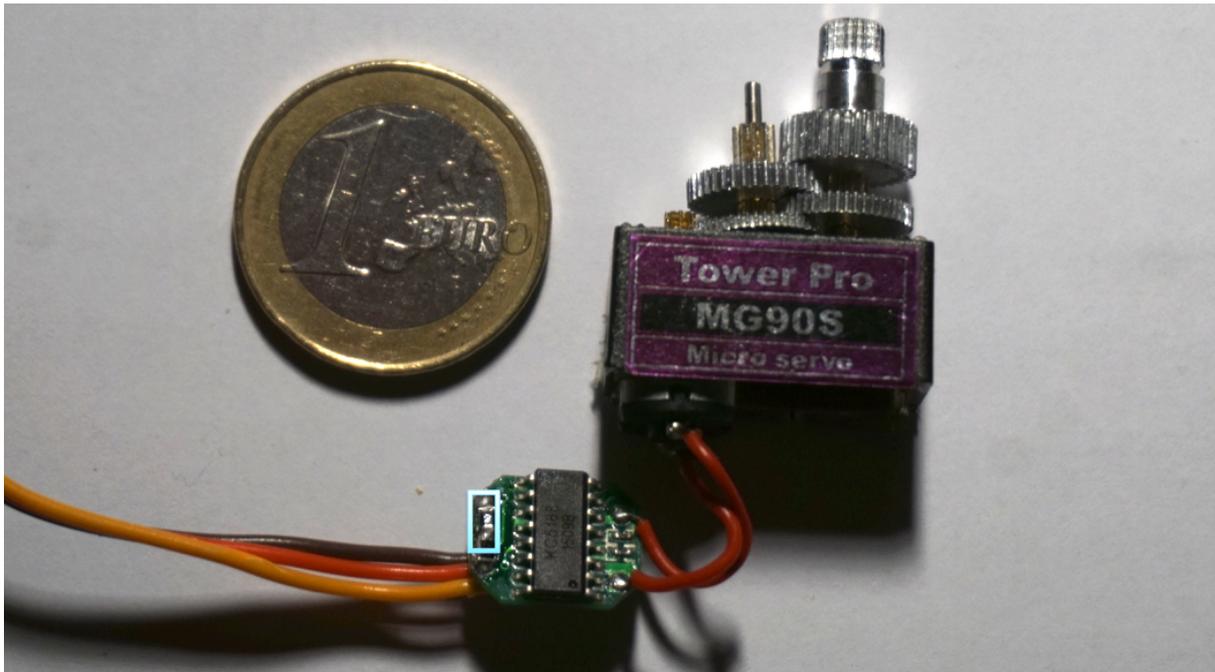


Abbildung 8: Modifizierter Servomotor

Dafür bedarf es einer Modifikation, welche umgangssprachlich auch „hacken“ genannt wird. Dazu schraubt man den Motor auf, nimmt die Steuerungsplatine heraus und lötet die Kabel vom Potentiometer ab. Anstelle der drei Kabel des Potentiometers wird anschließend eine Widerstandsbrücke mit zwei identischen Widerständen an die Platine gelötet, um dadurch eine Mittelstellung des Potentiometers zu simulieren.²⁷ Wegen der geringen Baugröße der MG90 Servomotoren müssen extrem kleine, sogenannte SMD (surface-mount device, deutsch: oberflächenmontiertes Bauelement) Widerstände eingelötet werden (siehe blauer Kasten in Abbildung 8). In einem weiteren Arbeitsschritt wird das Potentiometer so umgebaut, dass es kontinuierlich drehen kann, da es gleichzeitig als sogenannte Endachse dient. An diese werden später die Räder befestigt. Zuletzt wird der Anschlag aus einem der Zahnräder im Getriebe herausgefeilt. Wenn man den Servomotor nun auf genau 90° ansteuert, würde er sich, wegen der simulierten Mittelstellung des Potentiometers, nicht bewegen. Um ihn gegen den Uhrzeigersinn zu drehen, muss man ihn deswegen auf Werte unter 90° ansteuern. Für Werte über 90° dreht der Motor dementsprechend im Uhrzeigersinn. Je näher die Werte an 90° liegen, desto langsamer dreht er.

²⁷ @11

3.2.4. Fortbewegung mit Mecanum Rädern

Ein Mecanum Rad ist ein Rad, auf dessen Felge sich mehrere tonnenförmige Rollen befinden, die meistens in einem Winkel von 45° zur Drehachse angeordnet sind (siehe Abbildung 9). Für ein Auto mit vier Rädern werden zwei verschiedene Bauarten von Räder so angeordnet, dass alle Rollen in die Fahrzeugmitte zeigen. Mit dieser Art von Bereifung lässt sich frei in alle Richtungen fahren, ohne eine herkömmliche Lenkung nutzen zu müssen. Darüber hinaus kann man mit einer solchen Konstruktion auch auf der Stelle drehen.²⁸

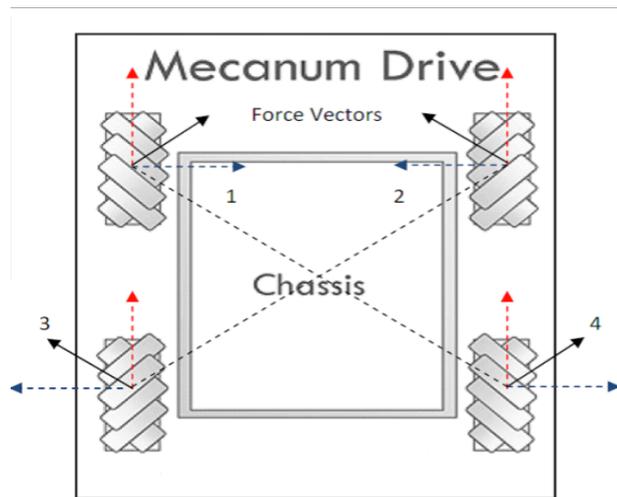


Abbildung 9: Mecanum Rad

Abbildung 10: Teilkräfte der Räder

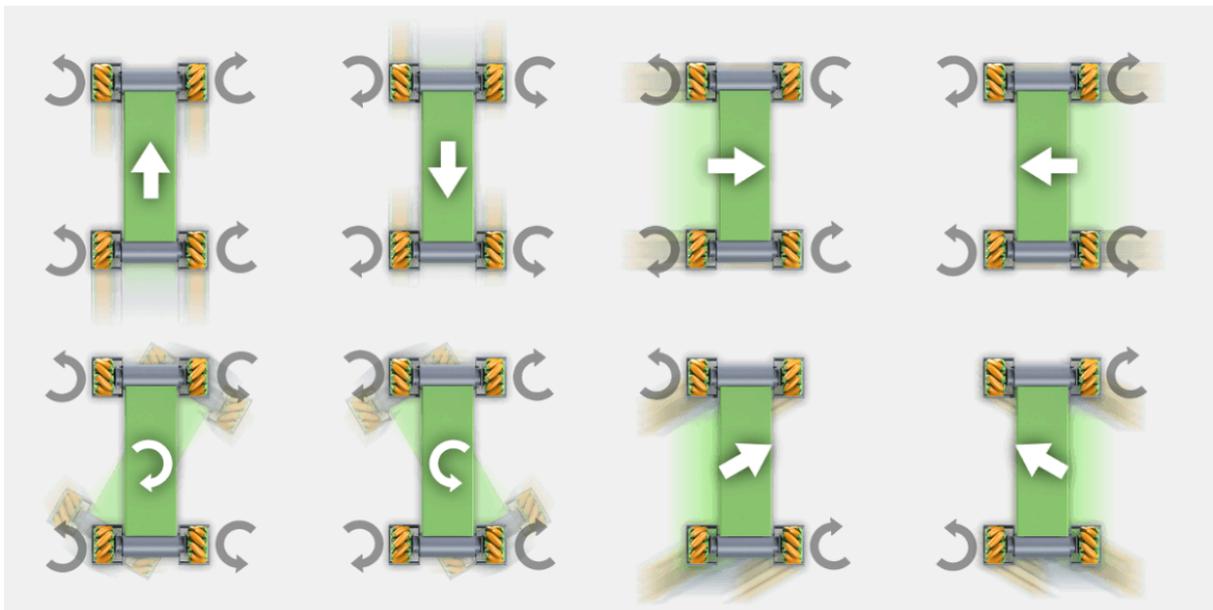


Abbildung 11: mögliche Bewegungen

²⁸@5

Voraussetzung dafür ist, dass sich jedes Rad bezüglich Geschwindigkeit und Richtung individuell ansteuern lässt. Dabei wirken, im Gegensatz zu herkömmlichen Reifen, zwei Teilkräfte. Bei einer Vorwärtsdrehung des linken Vorderrades entstehen zwei Teilkräfte, die nach vorne sowie nach rechts wirken (siehe Abbildung 10). Um das Fahrzeug gerade nach vorne zu bewegen, reicht es aus, wenn alle Räder vorwärts rotieren. Hierbei haben alle Räder jeweils einen Kraftvektor, der nach vorne wirkt. Die seitlichen Kraftvektoren der gegenüberliegenden Räder heben sich gegenseitig auf. Um seitwärts fahren zu können, müssen die Räder so drehen, dass sich die Kräfte nach vorne, beziehungsweise nach hinten aufheben und nur noch Kräfte zur Seite wirken (siehe Abbildung 11). Die Schwierigkeit bei den Mecanum Rädern in Verbindung mit den Servomotoren bestand in der Kupplung der beiden Komponenten, da diese Art von Servomotoren keine Welle besitzen, um Räder anzutreiben. Außerdem ist es sehr wichtig, dass das Gewicht auf allen vier Rädern gleich verteilt ist, damit sich die Teilkräfte exakt aufheben. In Verbindung mit der improvisierten Kupplung von Motor und Rad stellte sich dies als nicht so einfach heraus (siehe Fazit).

3.2.5. Die 3D-gedruckte Fahrzeugkarosserie



Abbildung 12: Fahrzeugkarosserie

Die Fahrzeugkarosserie besteht insgesamt aus zehn Einzelteilen. Sie kann in fünf Ebenen, die aus bis zu drei Teilen bestehen, unterteilt werden (vgl. Abbildung 12). In der untersten Ebene befinden sich die Infrarotsensoren, die Induktionsspule mit dem Spannungswandler, sowie die Kabelführung zu den Sensoren und Motoren. Diese Ebene befindet sich sehr nah an der Fahrbahnoberfläche, damit die Infrarotsensoren und die Induktionsspule möglichst gut funktionieren. In der Ebene darüber sitzen neben den nach vorne und hinten gerichteten Ultraschallsensoren alle fünf Motoren und der Akku. Auf der folgenden Ebene befindet sich die Hauptplatine mit dem Mikrokontroller. Außerdem liegt in dieser dritten Ebene vorne eine Lithium-Polymer-Ladeplatine, um den Akku zu laden. Eine nächste Zwischenebene stellt lediglich die Abdeckung für die Elektronik dar. Der aufsteckbare Aufbau des Fahrzeugs, mit Ladefläche und Fahrzeugkabine, bildet die oberste Ebene, die aber keinen praktischen Nutzen hat. Alle anderen Ebenen sind miteinander verschraubt und können so bei Bedarf wieder geöffnet werden. Außer den Infrarotsensoren und der Induktionsspule sind alle Komponenten lediglich in die Karosserie gesteckt, um sie ohne großen Aufwand auswechseln zu können. Auf der linken Seite des Fahrzeugs befindet sich der ausklappbare Sensorarm (rot), mit dem die Fahrbahnmarkierung erfasst wird. Dieser ist an einen Servomotor aufgesteckt, damit man ihn einklappen kann, wenn er nicht gebraucht wird.

3.2.6. Sensoren des Fahrzeuges

Wie schon in Kapitel 2.1. erwähnt, sind Sensoren unabdingbar für autonomes Fahren. Aufgrund der geringen Leistung des ATmega2560, im Vergleich zu Bordcomputern von echten autonom fahrenden Autos, können keine Kamera oder Lidar Systeme verwendet werden. Auch die Orientierung per GPS macht in diesem Maßstab keinen Sinn. Deshalb wurde hier auf mehrere Infrarot- und Ultraschallsensoren, sowie auf ein Gyroskop zurückgegriffen.

3.2.6.1. Ultraschall Entfernungssensor HC-SR04

Ultraschall Sensoren werden, wie auch bei echten Autos, zur Entfernungsmessung eingesetzt. Sie senden eine Schallwelle aus und messen die Zeit bis die reflektierte Schallwelle wieder empfangen wird. Mit dieser Zeit (t) und der Schallgeschwindigkeit in Luft bei 20°C ($c_s = 343 \frac{m}{s}$) kann man die Entfernung (e) ausrechnen.²⁹

²⁹ @28

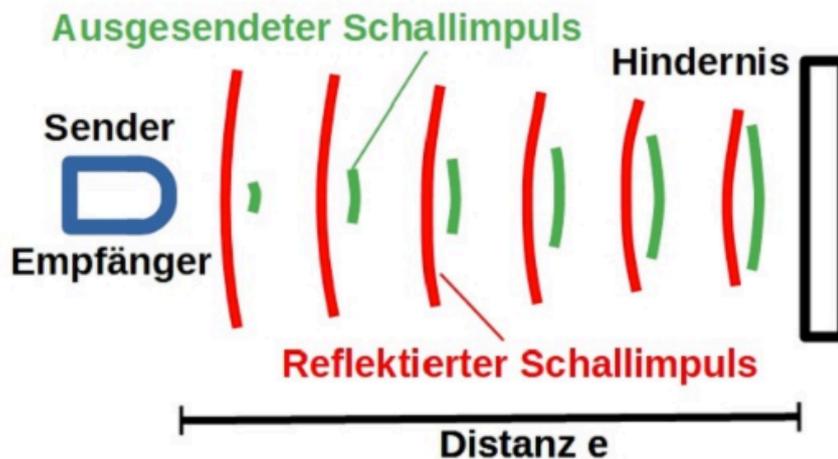


Abbildung 13: Funktion eines Ultraschallsensors

$$v = \frac{s}{t}$$

$$c_s = \frac{2e}{t}$$

$$e = \frac{c_s \cdot t}{2}$$

Das HC-SR06 Modul hat einen getrennten Sender und Empfänger eingebaut. Angesteuert wird das Modul, indem man ein $10\mu\text{s}$ langes Signal auf den sogenannten „Trigger Pin“ schaltet.³⁰ Daraufhin sendet der Sensor acht 40kHz Ultraschallsignale hintereinander und schaltet dabei den „Echo Pin“ solange ein, bis das Signal wieder empfangen wird.³¹ Um die Entfernung mit dem Arduino zu bestimmen, muss die Zeit gemessen werden, die der „Echo Pin“ eingeschaltet ist. Mit oben genannter Formel wird dann die Entfernung ausgerechnet. Der HC-SR04 kann somit Entfernungen von ca. 4cm bis 200cm messen.

3.2.6.2. Infrarotsensor QRE1113 zur Linienerkennung

Dieser Infrarotsensor ist ungefähr 4mm x 3mm groß. Er wird im „Volkmer-Wagen“ verwendet, um den weißen Untergrund von den schwarzen Linien zu unterscheiden. Der QRE1113 besteht aus einer Infrarot-LED und einem Infrarot-Fototransistor.³² Um zwischen Schwarz und Weiß unterscheiden zu können, leuchtet die Infrarot-LED permanent. Da Lichtwellen auf schwarzen Oberflächen stärker absorbiert werden, entsteht eine geringere Reflexion. Der

³⁰ @8

³¹ @18

³² @6

Fototransistor gibt eine Spannung, abhängig von der Intensität des einfallenden Infrarotlichts, aus. Diese Spannung kann dann mithilfe eines analogen Eingangs des Mikrokontrollers ausgelesen und verarbeitet werden. QRE1113 Sensoren funktionieren nur dann verlässlich, wenn der Abstand zwischen Sensor und Oberfläche gleich bleibt und sich das Umgebungslicht nicht stark ändert. Deshalb wird jeder einzelne Sensor vor dem Start automatisch kalibriert. Das Auto muss dazu nach dem Einschalten auf einen weißen Untergrund gestellt werden. Vor der Kalibrierung klappt der Sensorarm nach unten, um anschließend 30 Messungen mit jedem Sensor durchzuführen und den Durchschnitt zu berechnen. Den individuellen Schwellwert eines Sensors zwischen weiß und schwarz erhält man, wenn auf alle Kalibrierungsergebnisse der fünf Sensoren eine Konstante als Puffer dazugerechnet wird. Dieser Schwellwert kann nun mit dem aktuellen Messergebnis des jeweiligen Sensors verglichen werden. Er liefert so ein ausreichend genaues Ergebnis.

3.2.6.3. Beschleunigungssensor MPU6050 und Gyroskop 6-DOF IMU

Der Beschleunigungssensor und das Gyroskop sind auf einer Platine verbaut. Jedoch wird für das Auto lediglich die Information zur z-Achse des Gyroskops benötigt. Ein Gyroskop kann aufgrund des Piezoeffektes die Winkelgeschwindigkeit³³ erfassen, mit der man wiederum eine Drehänderung berechnen kann.³⁴ Für den „Volkmer-Wagen“ wird lediglich die Winkeländerung auf der z-Achse, also die horizontale Drehung, benötigt. Beim Start des Autos wird der aktuelle Winkel auf 0° gesetzt. Mithilfe des Gyroskops wird die Abweichung vom Startwinkel bestimmt, um so zum Beispiel beim geradeaus Fahren gegenzulenken oder in Kurven auf genau 90° zu drehen.

³³ @16

³⁴ @25

3.3. Software des autonom fahrenden Fahrzeugs

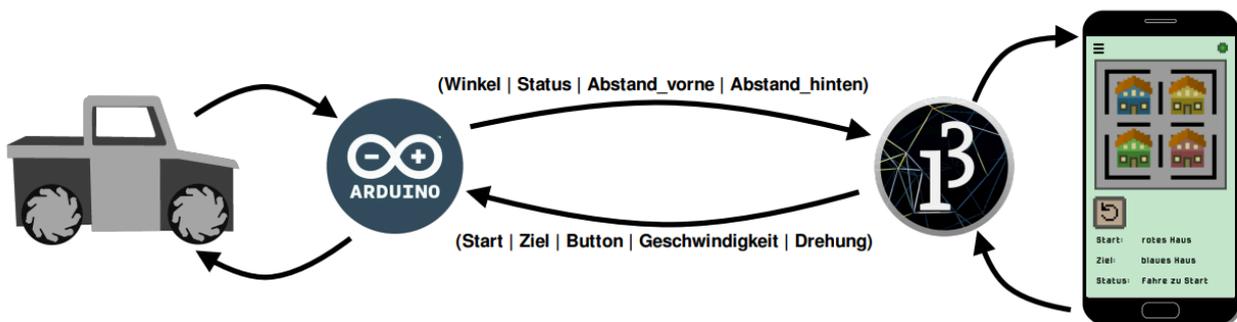


Abbildung 14: Kommunikation Arduino - Processing

Das Auto ist mit der Arduino IDE programmiert und wird durch eine mit Processing programmierte App gesteuert. Die Eingaben des Benutzers werden per Bluetooth an das Arduino kompatible Mega 2560 PRO gesendet. In diesem Datenpaket sind z.B. Start- und Ziel-Haus, die gedrückten Buttons der Fernbedienung, die Stellung des Gashebels und die Neigung des Smartphone enthalten. Die einzelnen Werte werden durch ein Verkettungszeichen „|“ (siehe Abbildung 14) getrennt, um anschließend am Arduino wieder separiert werden zu können. Das Arduino wiederum sendet alle 100 Millisekunden folgende Daten an das Smartphone zurück: Den aktuellen Winkel, den Status des Autos und die Distanz nach vorne und hinten zu einem Hindernis.

3.3.1. Arduino Sketch

Auf dem Mikrokontroller im Fahrzeug läuft der Arduino Sketch. Dort werden alle Daten der Sensoren des Autos und der Bluetooth Schnittstelle verarbeitet, um die Motoren anzusteuern. Ein Arduino Sketch hat immer eine „setup“ Funktion, die nur einmal am Anfang abgefragt wird, und eine „loop“ Funktion, die nach dem Abarbeiten aller Befehle wieder von vorne anfängt.

3.3.2. Android-App mit Processing

Die Android-App wurde mit Processing programmiert. Sie stellt die Benutzeroberfläche dar und sendet die Eingaben an das Arduino. Der Nutzer wiederum bekommt den Status des Autos sowie relevante Sensordaten, wie zum Beispiel den Abstand nach vorne und hinten, angezeigt.

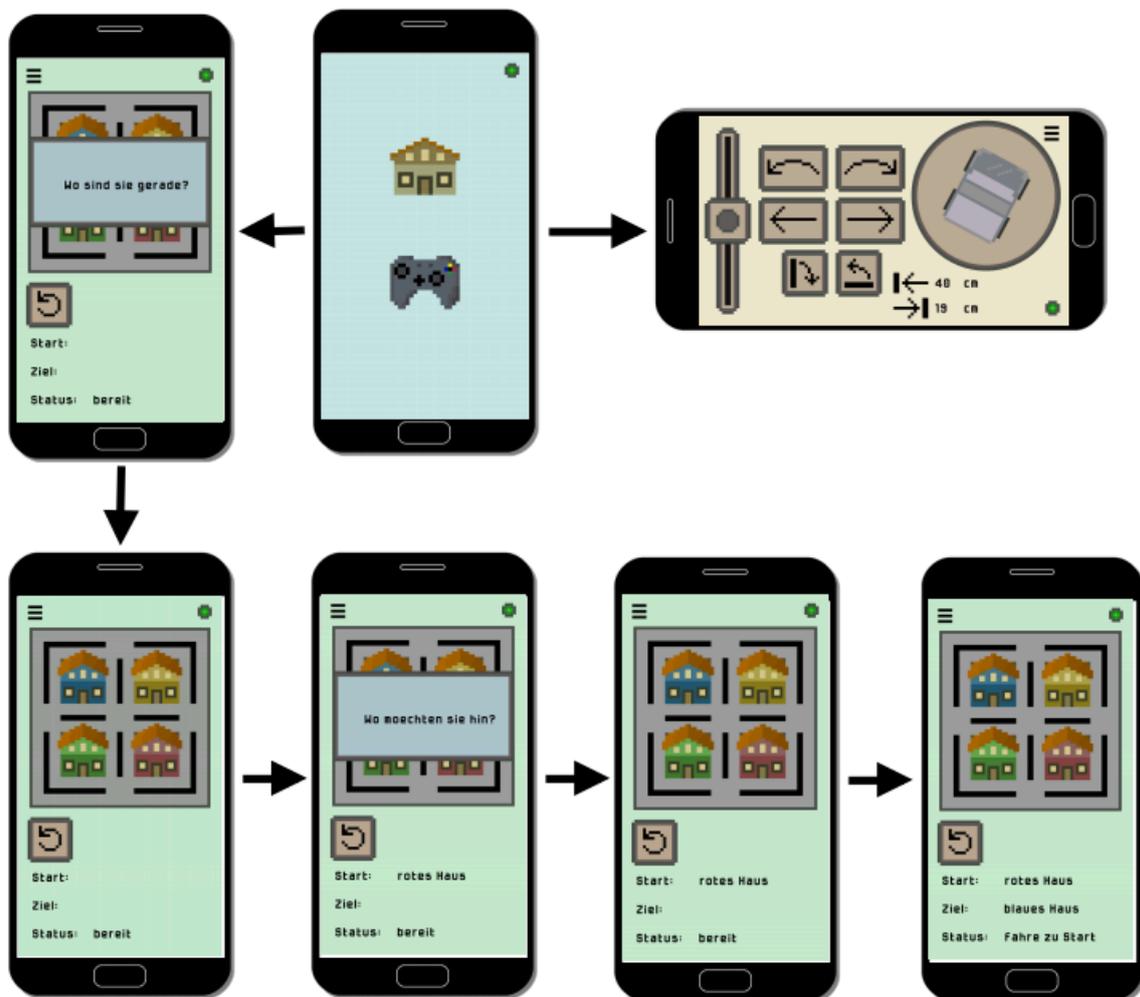


Abbildung 16: Die „Volkmer-Wagen“ App

Mithilfe des Hauptmenüs (siehe Abbildung 16, oben Mitte) lässt sich vom autonomen in den ferngesteuerten Modus wechseln. Der Kreis in der rechten oberen Ecke zeigt an, ob das Fahrzeug verbunden ist (grün) oder nicht (rot). Im autonomen Modus öffnet sich zuerst ein Dialogfenster, welches den Nutzer auffordert, das Start-Haus einzugeben, bei dem er abgeholt werden will. Anschließend öffnet sich ein weiteres Dialogfenster für das Ziel-Haus. Im Fahrbetrieb lässt sich das Auto über die Statusmeldungen in der untersten Zeile verfolgen. Im zweiten, dem ferngesteuerten Modus, kann die Geschwindigkeit des Autos über den Gashebel links bedient werden. Um Kurven zu fahren muss man lediglich Gas geben und

dabei das Smartphone in die gewünschte Richtung neigen. Mit den sechs Buttons in der Mitte des Bedienfeldes lassen sich folgende Aktionen ausführen: auf der Stelle drehen, seitwärts fahren und den Sensorarm bewegen. Die Grafik rechts oben, im ferngesteuerten Modus, gibt Aufschluss über die Drehung des Autos sowie den Status des Sensorarms. Unten rechts kann man der App entnehmen, wie groß der hintere und vordere Abstand des Fahrzeugs zu einem Hindernis ist.

4. FAHRBETRIEB DES „VOLKMER-WAGENS“ IN DER REALITÄT

Im Praxistest des Fahrbetriebs zeigten sich einige Schwierigkeiten. Zum einen reicht der verbaute 500mAh Akku nur für ca. 30 Minuten ununterbrochenen Fahrbetrieb. Deshalb wurde das Auto so umgebaut, dass es zusätzlich an eine externe Stromversorgung angeschlossen werden kann. Außerdem sind, im Gegensatz zu echten Straßen, alle Fahrbahnbegrenzungen als durchgezogene Linien gekennzeichnet, um dem Auto eine erleichterte Linienerkennung zu ermöglichen. Vernachlässigt man diesen Aspekt, ist das Ziel fast komplett erreicht worden: den Passagier auf der Testumgebung abholen, woanders hinzubringen und anschließend wieder zurück zufahren (siehe Punkt 3.) Das Einzige was dabei nicht umgesetzt wurde ist, dass das Auto nach der Fahrt wieder auf eine Induktionsladestelle fährt, um für eine neue Fahrt bereit zu sein. Zu sehen ist das Ergebnis neben den Bildern im Anhang in einem kurzen Film, der den „Volkmer-Wagen“ präsentiert.

4.1. Fortbewegung auf einer Testumgebung

Im autonomen Modus überprüft das Auto kontinuierlich, ob es sich an einer Stelle befindet, bei der eine spezielle Aktion erforderlich ist - wie zum Beispiel eine Kurve oder eine Kreuzung. Wenn dies nicht der Fall ist, folgt es der Mittellinie bzw. sucht durch Links- und Rechtsbewegungen nach ihr. Um der Mittellinie zu folgen, werden die drei seitlichen Infrarotsensoren sowie das Gyroskop verwendet. Das Auto fährt korrekt, wenn der mittlere Infrarotsensor die schwarze Fahrbahnbegrenzung erkennt. Sobald der linke Sensor schwarz bemerkt, muss das Auto nach links korrigieren, da es sich dann zu weit rechts auf der Fahrbahn befindet. Dementsprechend muss es nach rechts fahren, wenn der rechte Sensor schwarz erkennt. Da alle Linien gerade verlaufen, kann das Auto mithilfe des Gyroskops und dem „Soll-Winkel“, der auf geraden Strecken konstant bleibt, bei Bedarf Fehlstellungen ausgleichen. Dies bedeutet, dass das Auto neben der Links-rechts-Korrektur ständig eine

zusätzliche Richtungskorrektur vornimmt. Auch beim Abbiegen oder Kurvenfahren übernimmt das Gyroskop eine wichtige Rolle, da im Falle einer Kurve zu dem „Soll-Winkel“ 90° dazugerechnet oder abgezogen wird. Anschließend wird eine Kurve gefahren bis die Drehung des Autos mit dem „Soll-Winkel“ übereinstimmt.

4.2. Reaktion auf Hindernisse und äußere Faktoren

Um das Auto möglichst praxisnah zu bauen, ist auch das Reaktionsverhalten auf andere Verkehrsteilnehmer bzw. Hindernisse berücksichtigt worden. Sobald sich ein Hindernis zu nah vor dem Auto befindet, bremst es selbstständig ab und fährt erst wieder weiter, wenn das Hindernis beseitigt wurde. Da die Infrarotsensoren empfindlich auf Streulicht reagieren, wird das Fahrverhalten des Autos stark beeinflusst. Gelöst wurde das Problem, wie schon in Punkt 3.2.6.2. erwähnt, durch eine automatische Kalibrierung beim Einschalten des Fahrzeugs. Ultraschallsensoren wiederum reagieren unterschiedlich auf verschiedene Materialien. Bei der Abstandsmessung zu Objekten mit einer schallabsorbierenden Oberfläche, bekommen die Ultraschallsensoren oft kein Signal zurück, da diese den Schall absorbieren. Daraus folgt, dass das Auto z.B. einen potenziellen Fußgänger mit einem Wollpullover auf der Testumgebung nicht erkennen würde.

5. FAZIT ZUM PROJEKT „VOLKMER-WAGEN“

Der Projektumfang fiel deutlich größer aus als erwartet. Insgesamt wurden für die Konstruktion des Fahrzeugs, die Programmierung und den Baus des Testparcours über 300 Stunden benötigt.

Im Nachhinein würde man zumindest zwei Problemstellungen anders angehen. Zum einen wäre es zielführender gewesen, die Räder auf eine andere Weise an die Motoren zu koppeln: Statt die Achse mit einer Klemmverbindung durch zwei Madenschrauben zu fixieren, würde man diese nun in das letzte Zahnrad, das zum Teil aus dem Motor herausragt, hineinschrauben. Dadurch würden die Räder deutlich stabiler an den Motoren sitzen und weniger eiern. Zum anderen würde man andere Komponenten für das induktive Laden verwenden. Die Praxis hat gezeigt, dass die Stromstärke aus der Induktionsspule, trotz minimalem Abstand zur zweiten Spule, nicht ausreichend war, um den Akku vollständig zu laden. Geschickter wäre es gewesen, eine Induktionsspule eines Smartphones, die einen Ausgang von 1A hat, in Verbindung mit dem entsprechenden induktiven Ladegerät zu verwenden.

Eine Weiterentwicklung des „Volkmer-Wagens“ könnte folgendermaßen aussehen: An der Karosserie würde man, Scheinwerfer, Blinker und Bremslichter integrieren. Dazu müsste man an die Hauptplatine einen adressierbaren LED-Strip anstecken und je zwei LEDs vorne, seitlich und hinten am Fahrzeug anbringen. Des Weiteren könnte man das Auto nach dem Einsatz selbstständig zu seiner Induktionsladestelle fahren lassen. Dort wartet der „Volkmer-Wagen“ dann, bis er wieder neue Anweisungen bekommt.

Schlussbemerkung: Neben den vielen Vorteilen des autonomen Fahrens für den Nutzer, sollte man auch einen weiteren Vorteil für den Hersteller erwähnen. Es werden unglaublich viele personenbezogene Daten anfallen, die man auch für andere Zwecke missbrauchen kann. Selber fahren kann auch Spaß machen.

6. ANHANG:

6.1 Literaturverzeichnis

Bücherquellen:

| Kürzel | Quellennachweis |
|--------------|---|
| Ger15 | Gerke, Wolfgang (2015). Technische Assistenzsysteme – Vom Industrieroboter zum Roboterassistenten . Berlin: De Gruyter Oldenbourg |
| Mau15 | Maurer, Markus (2015). Autonomes Fahren – Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Heidelberg: Springer Verlag |

Internetquellen:

| Kürzel | Quellennachweis |
|-----------|---|
| @1 | ADAC (10.8.2018). Autonomes Fahren: Die 5 Stufen zum selbstfahrenden Auto. Verfügbar unter: https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autonomes-fahren/autonomes-fahren-5-stufen/ [4.11.2018] |
| @2 | Baldwin, Roberto (10.10.2017). NVIDIA introduces a computer für level 5 autonomous cars. Verfügbar unter: https://www.engadget.com/2017/10/10/nvidia-introduces-a-computer-for-level-5-autonomous-cars/?guccounter=1 [11.06.18] |
| @3 | Becker, Joachim (5.8.2016). Mit Lidar sollen Autos richtig sehen lernen. Verfügbar unter: http://www.sueddeutsche.de/auto/autonomes-fahren-mit-lidar-sollen-autos-richtig-sehen-lernen-1.3106087 [11.06.18] |
| @4 | CCM (28.10.2017). Funktionsweise von Bluetooth. Verfügbar unter: https://de.ccm.net/contents/605-funktionsweise-von-bluetooth [4.11.2018] |
| @5 | DONKEYmotion. Mecanum-Rad: Bewegung wie auf Luftkissen bei voller Bodenhaftung. Verfügbar unter: https://www.donkey-motion.de/donkeymotion/mecanum [4.11.2018] |
| @6 | Fairchild Semiconductor Corporation (2009). QRE1113, QRE1113GR Minature Reflective Object Sensor. Verfügbar unter: https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/QR_QRE1113.GR.pdf [4.11.2018] |
| @7 | Felizco, Jose (12.10.2015). Image Sensor. Verfügbar unter: https://www.linkedin.com/pulse/image-sensor-best-biz-2020-2045-jose-felizco [11.06.18] |

| | |
|------------|---|
| @8 | Gbati, Israel (13.8.2017). On Writing Drivers for the HC-SR04 Ultrasonic Sensor. Verfügbar unter: https://medium.com/@Magna/on-writing-drivers-for-the-hc-sr04-ultrasonic-sensor-124596e63fd5 [4.11.2018] |
| @9 | Global Automotive Consumer Study (2018). Deutsche Autokäufer sind noch nicht bereit für Elektroautos und autonomes Fahren. Verfügbar unter: https://www2.deloitte.com/de/de/pages/consumer-industrial-products/articles/automotive-consumer-study-2018.html [4.11.2018] |
| @10 | Greis, Friedhelm (17.1.2017). Laserscanner für den Massenmarkt kommen. Verfügbar unter: https://www.golem.de/news/autonomes-fahren-laserscanner-fuer-den-massenmarkt-kommen-1701-125585.html [11.06.18] |
| @11 | Haas, Joachim (2016). Ein Servo dreht durch. Verfügbar unter: https://www.heise.de/select/make/2016/1/1456123019999571 [4.11.2018] |
| @12 | Hochschule Esslingen. GPS – Funktionsweise und mathematische Grundlagen. Verfügbar unter: http://www2.hs-esslingen.de/~abel/gps/Abel-GPS.htm [11.06.18] |
| @13 | Hochschule RheinMain. GPS wie funktioniert's. Verfügbar unter: https://www.cs.hs-rm.de/~linn/fachsem0910/harbach/GPS_Ausarbeitung.pdf [11.06.18] |
| @14 | IMO Institut. Autonomes Fahren den USA und Deutschland. Verfügbar unter: http://www.imo-institut.de/shaping-facts/automotive/autonomes-fahren-in-den-usa-und-deutschland.html [4.11.2018] |
| @15 | International Journal of Science and Applied Information Technology (2013). Object Distance Measurement by Stereo Vision Verfügbar unter: http://warse.org/pdfs/2013/icctesp02.pdf [11.06.18] |
| @16 | ITWissen (2.12.2012). Gyrosensor. Verfügbar unter: https://www.itwissen.info/Gyrosensor-gyro-sensor.html [4.11.2018] |
| @17 | Jernej Mrovlje, Damir Vrančić (3.10.2008). Distance measuring based on stereoscopic pictures. Verfügbar unter: http://dsc.ijs.si/files/papers/s101%20mrovlje.pdf [11.06.18] |
| @18 | Jones, Marlin. HC-SR04 User Guide. Verfügbar unter: https://www.mpja.com/download/hc-sr04_ultrasonic_module_user_guidejohn.pdf [4.11.2018] |

| | |
|------------|--|
| @19 | Kohanbash, David (4.5.2017). LIDAR vs RADAR: A Detailed Comparison. Verfügbar unter: http://robotsforroboticists.com/lidar-vs-radar/ [11.06.18] |
| @20 | Köllner, Christiane (9.2.2017). Autohersteller setzen auf Lidar Sensoren. Verfügbar unter: https://www.springerprofessional.de/sensorik/automatisiertes-fahren/autohersteller-setzen-auf-lidar-sensoren-/12051902 [11.06.18] |
| @21 | Magicmaps (2018). Wie funktioniert Satellitennavigation? Verfügbar unter: https://www.magicmaps.de/produktinfo/gps-grundlagen/wie-funktioniert-gps.html [11.06.18] |
| @22 | Pillau, Florian (20.10.2016). Hardware für autonomes Fahren in allen Teslas. Verfügbar unter: https://www.heise.de/autos/artikel/Hardware-fuer-autonomes-Fahren-in-allen-Teslas-3355389.html [11.06.18] |
| @23 | Quinn James (10.10.2017). Cameras: The Eyes of Autonomous Vehicles. Verfügbar unter: https://sites.tufts.edu/jquinn/2017/10/10/cameras-the-eyes-of-autonomous-vehicles/ [11.06.18] |
| @24 | Reuters, Jak (27.2.2018). Kalifornien lässt selbstfahrende Autos ohne Lenkrad zu. Verfügbar unter: https://www.zeit.de/mobilitaet/2018-02/autonomes-fahren-kalifornien-zulassung-selbstfahrende-autos [4.11.2018] |
| @25 | Rinortner Kristin (5.9.20014). Funktion und Anwendungen von Beschleunigungssensoren und Gyroskopen. Verfügbar unter: https://www.elektronikpraxis.vogel.de/funktion-und-anwendungen-von-beschleunigungssensoren-und-gyroskopen-a-458045/index3.html [4.11.2018] |
| @26 | RobotDyn. Mega 2560 PRO. Verfügbar unter: https://robotdyn.com/mega-2560-pro-embed-ch340g-atmega2560-16au.html [4.11.2018] |
| @27 | Rudolph, Gert (18.12.2017). Welche Rolle spielt Lidar für autonomes Fahren? Verfügbar unter: https://www.all-electronics.de/welche-rolle-spielt-lidar-fuer-autonomes-fahren-und-welche-radar-und-kamera-ein-vergleich/3/ [11.06.18] |
| @28 | Schwarzer Martin. Der Ultraschallsensor. Verfügbar unter: https://www.technik-unterrichten.de/Robotik/Ultraschallsensor/Ultraschallsensor.php [4.11.2018] |
| @29 | Tesla. Hardware für autonomes Fahren in allen Fahrzeugen. Verfügbar unter: https://www.tesla.com/de_DE/autopilot?redirect=no [11.06.18] |

| | |
|------------|--|
| @30 | Tummala, Rao. Autonomous Cars: Radar, Lidar, Stereo Cameras. Verfügbar unter: http://ewh.ieee.org/soc/cpmt/presentations/cpmt1703f.pdf [11.06.18] |
| @31 | Xin, Ling (6.4.2011). [HC-06] Product Data Sheet. Verfügbar unter: https://www.olimex.com/Products/Components/RF/BLUETOOTH-SERIAL-HC-06/resources/hc06.pdf [4.11.2018] |
| @32 | Yasir Dawood Salman, Ku Ruhana Ku-Mahamud, & Eiji Kamioka. (2017). Distance Measurement for self-driving cars using stereo camera. Verfügbar unter: http://icoci.cms.net.my/PROCEEDINGS/2017/Pdf_Version_Chap04e/PID105-235-242e.pdf [11.06.18] |

6.2 Abbildungsverzeichnis

| Abb. | Beschreibung | Seite | Quellennachweis |
|------|------------------------------------|-------|---|
| 1 | Stereokameras | 5 | http://warse.org/pdfs/2013/icctesp02.pdf [11.06.18] |
| 2 | Triangulation | 8 | http://www.lernort-mint.de/Mathematik/Geometrie/dreieck.JPG [11.06.18] |
| 3 | Laufzeitmethode | 8 | http://www.hamamatsu.com/sp/hc/osh/ToFsetup_550x290.jpg [11.06.18] |
| 4 | Messung eines Lidarsystems | 9 | http://robotsforroboticists.com/lidar-vs-radar/ [11.06.18] |
| 5 | Der „Volkmer-Wagen“ | 11 | Eigenanfertigung |
| 6 | Hauptplatine oben | 13 | Eigenanfertigung |
| 7 | Hauptplatine unten | 13 | Eigenanfertigung |
| 8 | Modifizierter Servomotor | 14 | Eigenanfertigung |
| 9 | Mecanum Rad | 15 | https://www.generationrobots.com/de/403136-linkes-mecanum-rad-100-mm.html |
| 10 | Teilkräfte der Räder | 15 | http://currentsciences.info/index.php/ctst/article/download/276/206/ |
| 11 | Mögliche Bewegungen | 15 | https://www.donkey-motion.de/donkeymotion/mecanum |
| 12 | Fahrzeugkarosserie | 16 | Eigenanfertigung |
| 13 | Funktion eines Ultraschallsensors | 18 | https://www.technik-unterrichten.de/Robotik/Ultraschallsensor/Ultraschallsensor.php |
| 14 | Kommunikation Arduino - Processing | 20 | Eigenanfertigung |

| | | | |
|-----------|---------------------------------|----|------------------|
| 15 | Funktionen des Arduino Sketches | 21 | Eigenanfertigung |
| 16 | Die „Volkmer Wagen“ App | 22 | Eigenanfertigung |

6.3 Anlage

Der Seminararbeit sind ein Film, der das Auto präsentiert, der Arduino und der Processing Code mit allen Grafiken für die App, weitere Bilder des Entstehungsprozesses sowie Skizzen in digitaler Form beigelegt.

6.4 Erklärung

Ich, Jakob Volkmer, habe diese Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt.

Buchenberg, 5.11.2018