Eberhard Karls Universität Tübingen
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
Wilhelm-Schickard-Institut für Informatik

Bachelorarbeit Informatik

Erneuerung des Ct'Bots und Entwicklung eines Software-Frameworks

Tolga Demir

01.07.2019

Gutachter

Prof. Andreas Zell
Wilhelm-Schickard-Institut für Informatik
Lehrstuhl Kognitive Systeme
Universität Tübingen

Demir, Tolga:
Erneuerung des Ct'Bots und Entwicklung eines Software-Frameworks
Bachelorarbeit Informatik
Eberhard Karls Universität Tübingen
tolga.demir@student.uni-tuebingen.de
MatrikelNr.: 4058061
Bearbeitungszeitraum: 01.04.-01.07.2019

Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe und dass alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen sind, durch Angaben von Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind. Diese Bachelorarbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form in keinem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt.

Ort, Datum | Unterschrift: Tolga Demir

Zusammenfassung

Hier kommt die Zusammenfassung hin!!!

Danksagung

Mein Dank gilt Prof. Zell, der diese Bachelorarbeit engagiert ermöglicht und begleitet hat.
Weiterhin möchte ich mich herzlich beim Wohnheim Rechberghaus bedanken für die Bereitstellung einer Werkstatt. Ohne diese Hilfe wären mir manche Arbeiten am Roboter kaum möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung **1**

1.1 Autonome Mobile Roboter 1

1.2 Ziel dieser Arbeit 1

1.3 Methodik und Beschränkungen 2

1.4 Gliederung und Aufbau 2

2 Grundlagen **3**

2.1 Hardware Mobiler Roboter 3

2.1.1 Mobile Hardware und ihre Lebenszeit 4

2.2 Software Mobile Roboter 5

2.3 Karten und SLAM 6

2.4 Zusammenfassung 8

3 Ct'Bot **9**

3.1 Erneuerung der Hardware 9

3.1.1 Vorhandene Hardware 10

3.1.2 Neue Hardware 13

3.2 Software-Framework 20

3.2.1 Python 20

3.2.2 PyBot- Framework 21

3.2.3 Hardware Treiber 21

3.2.4 Mapping 23

3.2.5 View 25

4 Evaluierung **27**
4.1 Hardware 27
4.1.1 Roboter Aufbau 27
4.1.2 Distanzsensoren 27
4.1.3 Maus-Sensor 28
4.1.4 Gyroskop 29
4.1.5 Diskussion und Bewertung 29
4.2 Map 29
4.2.1 Testumgebung 29
4.2.2 Ergebnis 29
4.2.3 Diskussion und Bewertung 30
4.3 Zusammenfassung 31

5 Zusammenfassung und Ausblick **32**
5.1 Zusammenfassung 32
5.2 Ausblick 33

A Anhang **34**

B Stück- und Preisliste **35**
B.1 Vorhandene Bauteile 35
B.2 Zugekaufte Sensorik 36
B.3 Sonstiges Material 36
B.4 Raspberry Pi und Zubehör 37
B.5 Gesamtpreis 37

C Baupläne **38**
C.1 Obere Platte 39
C.2 Mittlere Platte 40
C.3 Bodenplatte 41
C.4 Akku-Träger 42
C.5 PCB-Layout 43
C.6 PCB-Bestückung 44

D Pin-Belegung **45**

D.1 Pinbelegung an der Pi 45

D.2 Pinbelegung am MCP 46

D.3 Pinbelegung am AD-Converter 46

E Installationsanleitung **47**

E.1 Raspbian 47

E.1.1 Raspbian einrichten 47

E.1.2 I2C und Kamera 48

E.1.3 VNC-Server 48

E.1.4 WLan-Access-Point 48

E.1.5 Update and Upgrade 48

E.2 Python Bibliotheken 48

E.3 PyBot-Framework 49

Literaturverzeichnis **49**

Kapitel 1

Einführung

1.1 Autonome Mobile Roboter

Mobile Roboter werden für eine große Bandbreite an Arbeiten eingesetzt, darunter die Erkundung und das Verrichten von Arbeiten in menschenfeindlichen Umgebungen oder als Service-Roboter zum Rasenmähen oder Staubsaugen.
Die Bezeichnung autonom meint hierbei, dass die Roboter ihre Aufgaben selbstständig erledigen. Dazu gehören neben der reinen Tätigkeit auch Themen wie das Fahren, Erfassen von Zielen, Erstellen von Karten ihrer Umgebung und zurechtfinden in unbekanntem Terrain.
Mobile Roboter sind seit den 1960ern ein Feld intensiver Forschung mit vielen Applikationen in der Industrie. Seit den 2000ern werden eine Vielzahl von verschiedenen Mobilen Robotern für die Industrie produziert. Diese frühen Generationen von Robotern sind aus heutiger Sicht überholt. Oft lässt sich weder die Hardware noch die Software für moderne Anforderungen konfigurieren.
Eine Kernfrage dieser Arbeit ist, ob sich ein solcher Roboter, exakter: der Ct'Bot des Heise Verlags aus dem Jahr 2006, mit minimalem Aufwand an Kosten und Umbau so neu gestalten lässt, dass er diesen Herausforderungen gewachsen ist.
Dies würde die Wiederverwertbarkeit älterer Roboter ermöglichen und so einen erheblichen Beitrag zu Kostensenkung und zum Umweltschutz garantieren, welche mit einer Neuanschaffung nicht zu realisieren wären.

1.2 Ziel dieser Arbeit

Diese Bachelor-Arbeit widmet sich der Erneuerung des Ct'Bots. Dieser soll von Grund auf modernisiert und fit gemacht werden für die Anforderung neuerer Algorithmen und Datenschnittstellen. Der Roboter soll dabei nicht an Größe zunehmen und seine technischen Möglichkeiten weiterhin behalten.

Zugleich wird ein Python Framework entwickelt, welches ein solides Gerüst für weitere Anwendungsentwicklungen darstellt. Es soll intuitiv und schnell einsetzbar sein und die komplette Funktionalität des Roboters bereitstellen. Hierdurch wird

dem Roboter ein neuer Einsatzzweck ermöglicht.

1.3 Methodik und Beschränkungen

Durch Analyse der vorhandenen Hardware sollen Lücken im Funktionsumfang ausgebessert und der Roboter befähigt werden, eine Karte seiner Umgebung autonom aufzubauen. Dabei muss die beschränkte Genauigkeit kostengünstiger Sensorik beachtet werden. Zusätzlich soll die Modernisierung ein Budget von 100Euro für neue Hardware nicht übersteigen.

1.4 Gliederung und Aufbau

Diese Arbeit erörtert im Folgenden die Grundlagen der Mobilen Robotik Hardware und- eingeschränkt- das Thema Kartierung und SLAM (Simultainous Lokalization and Mapping). Danach wird ausführlich über die vorhandene Hardware und die Erneuerung des Roboters berichtet. Für den fertigen Roboter wird dann ein Software-Framework vorgestellt, welches eine Plattform für die komplette Funktionalität darstellt.
Abschließend werden verschiedene Tests des Prototypen präsentiert und die Ergebnisse erörtert.
Mit einer Zusammenfassung der Arbeit und einen Ausblick endet diese Dokumentation.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen, welche zum Verständnis dieser Arbeit benötigt werden kurz erläutert.

2.1 Hardware Mobiler Roboter

Ein Mobiler Roboter ist die Intelligente Verbindung von Wahrnehmung und Aktion, [McK91]. Mit dieser Definition ergibt sich für die Hardware-Anforderungen eines Mobilen Roboters eine minimale Anforderung von:

- Intelligenz:
  Ein Mobiler Roboter muss in der Lage sein komplexe Algorithmen auszuführen und - wenn möglich - aus seinem bisherigen Handeln zu lernen. Hierzu braucht er mindestens eine Hauptplatine für die Rechenarbeiten. Diese muss fähig sein, die Steuerung der restlichen Hardware auf Basis des Roboter-Wissens zu lenken. Hertzberger, Lingemann und Nüchter führen zusätzlich die Ungewissheit ein, mit welcher ein Mobiler Roboter umgehen muss. Durch die Veränderungen in seiner Umwelt kann ein Mobiler Roboter sollte ein dieser mit Ungewissheiten arbeiten und auf Veränderungen reagieren können, [Nü12].

- Wahrnehmung:
  Der Roboter interagiert mit seiner Umwelt. Im Gegensatz zu stationären Robotern verändert sich seine Umgebung dynamisch mit den eigenen Aktionen. Daher muss er diese Veränderungen wahrnehmen und messen können. Hierzu dienen Sensoren, welche z.B. die Distanz von Objekten, die Temperatur, Geräusche oder Luftfeuchtigkeit messen können. Kameras können dem Roboter ebenso nützlich sein wie reine Messsensorik. Insbesondere wenn Gegenstände erkannt und gefasst werden sollen. Welche Sensorik ein Mobiler Roboter braucht, hängt von seinem Einsatzort und -zweck ab.[1]
  Alle Mobilen Roboter brauchen hingegen eine Möglichkeit die eigene Position und Ausrichtung, genannt Pose, messen zu können. Dies kann über Sensorik

[1] Bei [Sch12] findet man eine außerordentlich große Liste aller möglichen Sensortechniken.

direkt am Roboter gemessen werden oder über erweitere Messdienste wie z.B. GPS-Daten oder in der Umwelt aufgestellte Positionsmarkierungen.

- Aktion:
  Mobile Roboter sollten in der Lage sein, physische Aktionen ausführen zu können um mit ihrer Umwelt interagieren zu können. Die Mobilität taucht dabei schon in der Bezeichnung auf und erfordert, dass der Roboter zumindest beweglich ist. Klassisch werden Mobile Roboter über Elektromotoren angetrieben und erhalten so die Möglichkeit ihre eigene Position in der euklidischen Ebene verändern zu können. Drohnen können sich dagegen drei Dimensional fortbewegen und erfordern eine komplexere Steuerung innerhalb der Aktionsplanung.
  Zur Roboter Aktion gehört oft ein Arbeitszweck und damit verbundene notwendige Aktoren wie z.B. Greifarme oder Behälter. Solche Hardware ist Roboter-spezifisch auf den Einsatz auszuwählen.

2.1.1 Mobile Hardware und ihre Lebenszeit

Gordon Moore behauptete 1965, dass sich die Komplexität von Integrierten Schaltkreisen alle zwei Jahre verdoppeln würde, [Gor65] Diese Aussage wurde bekannt als das Mooresche Gesetz und hält sich bis heute. Die Konsequenz daraus ist, dass jeder neu entwickelte Chip innerhalb weniger Jahre als Leistungsschwach gilt und nicht mehr dem Stand der Technik entspricht. Eine derart radikale und dauerhafte Erneuerung kennt sonst kein Industrieprodukt. Diese schnelllebige Entwicklung setzt sich vom Chip fort auf die fertigen Systeme. Insbesondere Mobile Roboter erleben mit jeder weiteren Generation einen enormen Leistungsschub. Durch die Knappheit von Ressourcen die eine Mobile Hardware mit sich bringt fällt jede weitere technische Innovation schwerer ins Gewicht. Sinkt zum Beispiel der Stromverbrauch des Hauptprozessors, so steigt als Folge die Laufzeit des akku-betriebenen Mobilen Roboters, während dieser Aspekt bei standort-gebundener Hardware kaum Nutzen bringt. Sinkt das Gewicht und die Größe von Sensorbauteilen so wirkt sich das ebenso erheblich auf Erscheinung, Funktionsumfang und -dauer des Mobilen Roboters aus.
Die Konsequenz dieser Erkenntnis wäre, Hardware und jede Chip-gebundene Technik im 2-3 Jahres-Rhythmus zu tauschen. Betrachtet man bei dieser Überlegung jedoch die Wirtschaftlichen und Umweltpolitischen Aspekte, so scheint das kontraproduktiv. Moderne Roboter können Preise bis weit über einen 6-stelligen Euro Betrag kosten (z.B betragen die reinen Produktions- und Entwicklungskosten des Atlas2 von BostonDynamics mehrere Millionen Dollar pro Stück)[2]. Versucht man nun seine Wirtschaftlichkeit auf einer Einsatzdauer von 2 Jahren zu berechnen, so muss das Resultat negativ ausfallen.
Gerade in Unternehmen, wird Hardware daher oft so lange wie möglich genutzt. Zumindest solange eine Möglichkeit besteht diese an die geforderten Arbeitsprozesse anzupassen.

[2] https://www.bostondynamics.com/atlas, abgerufen am 20.07.2019.

Innerhalb der Sensorik-Komponenten ist die Entwicklung ähnlich gelagert - obgleich auch die Erneuerung nicht so schnell wie im Chip-Bereich ausfällt. Insbesondere sind viele Sensoren früh in ihrer heute üblichen Form auf den Markt gekommen. Das zeigt z.B. der Reflexoptokopter wie er auch in unserem Roboter verbaut ist. Der CNY70 ist in seiner jetzigen Bauform schon seit 2001 auf dem Markt. Seitdem hat sich der Preis radikal reduziert (von einem hochklassigen Sensor zu einem 1Cent Produkt), jedoch nicht seine Einsatzgebiete. Reine Sensor-Produkte sind somit mehr von ihrer internen Laufzeit abhängig als von der Entwicklung des Marktes, da sie sehr häufig für einen spezifischen Zweck verbaut werden und nicht frei programmierbare sind.

2.2 Software Mobile Roboter

Moderne Mobile Roboter haben ein eigenes Betriebssystem, welches ihre Funktionen im Ganzen steuert und dem Anwender die Funktionalität als (modulares-) Framework bereitstellt. Dies erlaubt es dem Roboter, welche unterschiedlichste Hardware und Sensorik haben, schnell und einfach zu kontrollieren. Hierbei ist vor allem das Robot Operating System (ROS) in der Forschung weit verbreitet. ROS arbeitet mit einem Baukasten-Prinzip, das über Knoten die Anbindung von Sensoren und ihren Daten an einen Roboter ermöglicht. Roboterhersteller entwickeln hierauf aufbauend eigene Betriebssysteme oder Frameworks.[3]
ROS, als Open-Source-Projekt, wird von den Nutzern ständig weiterentwickelt und um Funktionalitäten erweitert. So sind komplexeste Algorithmen und Sensorsteuerungen direkt im System vorhanden und müssen nicht jedes Mal neu entwickelt werden. Dies ist als seine größte Stärke zu betrachten. Von Nachteil ist die Komplexität des Systems. Die vorhandenen Möglichkeiten zur Erweiterung und Steuerung machen ROS unübersichtlich und führen zu vielen Fehlern bei weniger geübten Nutzern. Des weiteren ist ROS ein großes System. Viele ältere Roboter und schwächere Hauptprozessoren sind nicht in der Lage ROS als Ganzes zu hosten. Es braucht auch nicht jeder Mobile Roboter das vollständige ROS, oft sind diese mit einem kleinen, für sie geschriebenen System schneller und zuverlässiger.
Als Alternativen für kleinere Systeme haben sich Rasbian, Embedded Linux, Linux Mini-Versionen oder Windows CE etabliert. Die Wahl hängt hier vom Hauptprozessor oder der Steuerungseinheit ab. So eignet sich der Rasbian dann, wenn der Mobile Roboter von einer Raspberry Pi gesteuert wird, während Arduino eine einfache Möglichkeit ist C Code auf einem gleichnamigen Chipset zu implementieren. Windows CE ist eine verschlankte Windows-Variante und sollte zu Beginn ein Betriebsystem für Mobilen Roboter darstellen. Es entwickelte sich aber eher in Richtung Mobile Telefone und Konsumenten-Endgeräte und wird daher kaum noch im Roboterbereich genutzt. Linux hingegen stellt mit seiner Embedded Variante ein Echt-Zeit-Betriebssystem für eine große Anzahl integrierter Chipsets bereit. Werden diese als Roboter vereinigt wird häufig eine Mini-Version eines Desktop-Linux-Systems verwendet. Hierfür eignen sich z.B. Pepermint, Lubuntu

[3]Eine Industry-ROS-Version wird von ABB eingesetzt. Farnuc und Kuka verwenden hingegen eigene ROS-basierte Abwandlungen oder nutzen ROS bei Bedarf.

oder Linux Lite.
Zu diesen Betriebssystemen gibt es noch weitere, spezialisierte Echt-Zeit-Betriebssysteme wie RTLinux oder VxWorks. Diese werden für die Controlle und Vernetzung einzelner Hardware-Komponenten genutzt. Seltener als Framework oder Betriebssystem für einen kompletten Roboter.

Die wichtigsten Eigenschaften eines Roboter-Frameworks sind somit :

- Wenig Speicherverbrauch:
  Durch die Begrenzung des Speicherplatzes vieler Mobiler Roboter ist ein kleines Betriebssystem zu bevorzugen.
- Schnelligkeit und Möglichkeit der Echt-Zeit-Datenverarbeitung:
  Hier müssen insbesondere Sensorik-Messdaten direkt ausgelesen und verarbeitet werden können. Dies muss schnell passieren. So braucht z.B. ein klassischer Ultraschall-Sensor für den Betrieb mindestens eine Verbindung zum verarbeitenden System, welche in Schallgeschwindigkeit die Messdaten ablesen kann.
- Geringer Energieverbrauch:
  Im Bereich der Mobilen Roboter dient der Akku als Hauptstromquelle. Dieser begrenzt die Laufzeit des Systems. Je weniger der Roboter im Ruhezustand verbraucht, umso länger kann er agieren.
- Möglichkeit der Sensor-Angliederung:
  Das Betriebsystem muss befähigt sein, Sensoren anzusprechen und Daten von diesen empfangen zu können.

Klassische Merkmale moderner Betriebssysteme, wie ein User-Interface, Daten-Manager oder Ausführbarkeit von 3D-Visualisierungen sind in der Robotik von nachrangigem Interesse.

2.3 Karten und SLAM

Die Grundlage jeder Interaktion mit seiner Umwelt stellt beim Mobilen Roboter seine Karte dar. Der Roboter bewegt sich innerhalb seiner Umwelt und muss dabei jederzeit wissen wo er sich befindet und wie er zu einem Bezugspunkt ausgerichtet ist. Verliert er dieses Wissen, so gilt er als verloren und ist nicht mehr in der Lage sich korrekt zu orientieren. Dadurch kann er keine weiteren Aufgaben sicher erledigen, welche eine Interaktion mit seiner Umwelt erfordern.
Mit Hilfe seiner Karte und seiner Ausrichtung kann nun der Roboter sich in seiner Umwelt bewegen, bestimmte Ziele ansteuern und Aufgaben erledigen. Startet der Roboter in einem unbekannten Umfeld, so muss er diese Karte selbstständig generieren. Dieser Prozess wird als Lokalisierung und Kartierung oder simultaneous localization and mapping, SLAM, bezeichnet. Dabei erkundet der Roboter den Raum, erfasst die wichtigsten Umwelt-Daten und hält seine veränderte Position im Bezug zu einem Ursprung zu jedem Zeitpunkt fest.
Dies wird häufig als Henne-Ei-Problem bezeichnet, da der Roboter eine Karte

braucht um sich zu positionieren und orientieren zu können, zeitgleich zum Erstellen der Karte seine Position und Orientierung kennen muss. Diese Probleme separat zu lösen ist für den Roboter einfach, jedoch zeitgleich beide Parameter abzuschätzen, schwer. Das größte Problem in einem SLAM-Algorithmus ist die Potenzierung von Fehlerwerten. Stimmen die Sensordaten zu Position und Orientierung nicht exakt, so treten kleine Verschiebungen auf, welche sich mit jeder weiteren Messung verstärken. SLAM ist eine Erweiterung der früheren Mapping Ansätze und ermöglicht durch Schätzungen und Verbesserung der Pose des Roboters die Erstellung besserer Karten in unbekannten Umgebungen. Dabei werden Positionen auf der Karte mit statistischen Belegungswahrscheinlichkeiten gefühlt um Ungewissheiten über die Umgebung auszudrücken. Ebenso wird die Roboter Pose in Frage gestellt und bei jeder Messung mit den vorherigen Iterationen überprüft und die Messdaten angepasst, besonders dann, wenn bereit bekannte Landmarken wiedererkannt werden. An diesen kann der Roboter seine jetzige Pose überprüfen und gegebenenfalls verbessern.
Ermöglicht wird ein Mapping-Algorithmus durch die Sensorik des Roboters. Dazu braucht er -meist - zwei Dinge:

1. Odometrie:
   Er muss jede Änderung seiner Position und Ausrichtung exakt messen können. Kann er dies nicht, so verliert er seine Position im Verhältnis zum Ausgangspunkt und die Karte kann nicht mehr korrekt berechnet werden. Dies nennt man Odometrie. In den frühen Jahren der Mobilen Robotik wurden hierfür Radsensoren eingesetzt. Diese sollten jede Bewegung des Roboterrads messen und damit Rückschlüsse auf gefahrene Strecke und Ausrichtung erlauben. Dies lässt sich einfach implementieren, gilt jedoch aufgrund von "wheel slips"(Radbewegungen ohne Bewegungen des Roboters oder Bewegung des Roboters ohne Bewegung der Räder) als sehr ungenau.
   Eine weitere Möglichkeit stellen Optical-Flow-Sensoren dar. Diese nehmen aus kürzester Distanz Bilder des Bodens auf. Jede Bewegung des Roboters resultiert nun in einer Verschiebung innerhalb des Bildes. Diese kann berechnet werden und gibt die Veränderung zwischen jeder Bewegung exakt wieder. Optical-Flow-Sensoren werden z.B. in Computer-Mäusen eingesetzt. In der Robotik sind Sie eine Nische, da ihre Nachteile (Sensor muss nah am Boden verbaut sein, Untergrund muss glatt und sauber sein) überwiegen.
   Odometrie Daten können auch über Kameras gewonnen werden. Diese funktionieren wie ein Opti-Flow-Sensor auf einem hoch-frequentierten Vergleich der Bilder miteinander.
   Ebenso eignen sich hierzu Lidar-Sensoren. Diese werden in neuesten Robotern standartmäßig genutzt. Ihre Messungen sind die Exaktesten, jedoch brauchen Sie komplexere Algorithmen und - ihr größter Nachteil - sind vergleichsweise teuer. Dafür erlauben Sie, ebenso wie manche Kameras, die implementierung von Algorithmen, welche Odometrie und Distanzmessung vereinigen.

2. Distanzsensoren:
   Bewegt sich der Roboter, muss er erkennen wo Hindernisse sind. Dies wird durch Distanz-Sensoren erreicht. Der Roboter misst nach jeder Bewegung die Abstände um ihn herum und kann so erkennen wie die Karte zu gestalten

ist. Dies kann über klassische Distanzsensoren, wie z.B. Ultraschall oder Lidar passieren, per Kamera oder sonstiger Sensorik.

Mit diesen gewonnen Daten kann der Mapping-Algorithmus eine Karte entwickeln. Algorithmen können dabei beide Punkte - Odometrie und Distanzmessung- in einem vereinigen. Viel genutzte Methoden sind beispielhaft Partikel- und Kalman-Filter. Diese Algorithmen haben dabei besondere Anforderungen an die genutzte Sensorik und die Genauigkeit der Daten.
Einfachere Mapping- und SLAM-Algorithmen verwenden Grid-Karten (Kacheln) und bilden so ihre Umwelt in einem skalierten 'Schachbrett' ab. Grid-Mapping-Algorithmen erstellen Karten mit gröberer Auflösung, sind dafür schneller und weniger komplex zu implementieren. Zudem sind die Anforderungen an die Sensorik geringer, da die Auflösung an den Roboter und die Genauigkeit der Sensoren angepasst werden kann.
Weitere Möglichkeiten für Karten wären statt eines Grids, diese nach markmalsbasierten (Feature-Based) oder topologisch (topological) Messpunkten aufzubauen.

2.4 Zusammenfassung

Hard- und Software bilden gemeinsam den Kern dieser Arbeit. Wie veranschaulicht wurde, braucht der Ct'Bot für verschiedene Aufgabenstellungen eine Möglichkeit sich in der Welt zurecht zu finden und sich ein Bild von dieser machen zu können. Im folgenden Kapitel soll mit Hilfe dieses theoretischen Wissens der vorhandene Roboter analysiert werden und jede seiner Komponenten auf Funktionsfähigkeit untersucht werden.
Danach wird die Software betrachtet und Entscheidungen bezüglich Umfang und Auswahlkriterien getroffen, sowie ein Framework vorgestellt, welches die Steuerung des Roboters ermöglicht.

Kapitel 3

Ct'Bot

Der Ct'Bot wurde 2006 von der Zeitschrift Ct' des Heise Verlags herausgebracht.[1] Er kostete in der Basisversion ab 250Euro und wurde als Baukasten ausgeliefert. Der Kunde musste die Sensorik-Bauteile auf die Platinen löten, die Platten miteinander verbinden und die mechanischen Bauteile verschrauben. [2]
Der fertiggestellte Roboter ließ sich über ein mitgeliefertes Kabel an den PC anschließen und programmieren. Kern der Software bildete ein offenes Betriebssystem, welches für den CT'Bot geschrieben wurde. Die Kern-Software war dabei gestellt und wurde durch User ständig erweitert. So wuchs die vorhandene Bibliothek an Funktionen mit der Anzahl der aktiven Nutzer.
Die Software selbst war in der Programmiersprache C gehalten und besaß eine Simulationsumgebung, welche geschriebenen Code in einer virtuellen Welt testen konnte. Leider ist das Projekt inzwischen eingestellt und wird nicht mehr vom Produzenten unterstützt. Es gibt keinen Zugriff mehr auf die Programmier-Bibliotheken und Ersatzteile können nicht mehr nachgekauft werden. Ebenso sind alle erschienen Artikel und das CT'Bot-Wikipedia verschwunden oder hinter Bezahlschranken. Das Projekt gilt als ausgestorben.[3]
Der Ct'Bot dieser Arbeit wurde im Rahmen einer Doktor-Arbeit zusammengestellt. Ziel war ein Multi-Slam-Algorithmus mit mehreren CT'Bots, welche von einem Controll-Tower geleitet wurden. Danach kam er nicht mehr zum Einsatz und wurde in der Universität Tübingen gelagert.

3.1 Erneuerung der Hardware

In diesem Kapitel wird die vorhandene Hardware analysiert und auf Verbesserungspotenzial untersucht. Dabei wird abgewogen zwischen jetziger Leistungsfähigkeit und der Möglichkeit neuer Sensorik sowie deren Preis.

[1] https://www.ct-bot.de/, abgerufen am 20.07.2019

[2] https://www.heise.de/ct/artikel/c-t-Bot-und-c-t-Sim-284119.html, abgerufen am 20.07.2019

[3] ein engagiertes Informatiker-Duo entwickelt heute noch Software für den klassischen Ct'Bot und kümmert sich um die verbliebenen Bibliotheken für Ct'Slim auf https://github.com/tsandmann/ct-bot . Abgerufen am 20.07.2019

3.1.1 Vorhandene Hardware

Der Ct'Bot, welcher den Grundstein für diese Arbeit legt, sollte folgendermaßen aufgebaut sein:

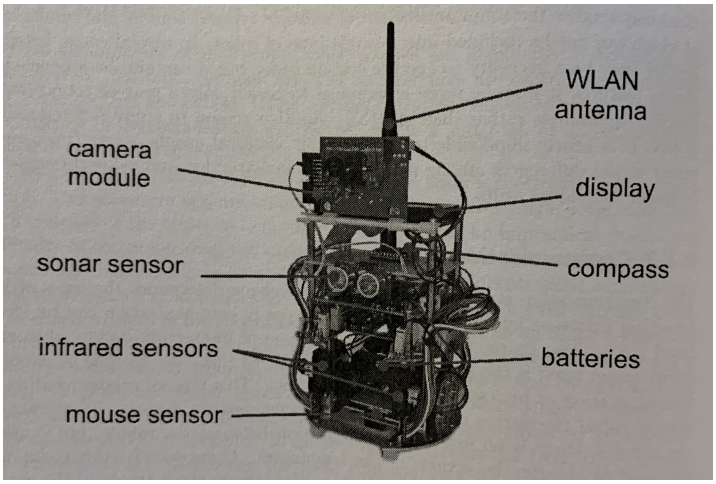


Abbildung 3.1: Mainboard

Die übergebene Hardware wurde auf Funktionsfähigkeit überprüft und hinsichtlich zukünftiger Einsatzfähigkeit analysiert.

Hauptplatine

Die erste Generation des Ct'Bot wurde mit einem Atmel ATmega32 bestückt. Dieser konnte jedoch zu einem ATmega644 erweitert werden, wie es auch bei dem vorliegenden Ct'Bot der Fall ist. Der ATmega 644 arbeitet dabei mit 24 MHZ, 4kB Ram und 64kB Flash Speicher.[4] Verbaut war der Hauptprozessor auf der mittleren Platine. Diese wurde oft Mainboard genannt, da es die komplette Sensorik bündelte und die einzige, standardmäßig verbaute Platine war.

Die CPU war ausreichend, um den Ct'Bot zu kontrollieren und einfache Aufgaben zu berechnen und auszuführen, scheiterte jedoch an größeren Daten oder Karten wegen mangelnder Rechenleistung und Speicherplatz.

Wheel-Encoder und Cliff-Detektoren

Als 'Lichtschranken' vermarktete CNY70 fungieren beim Ct-Bot als Wheel-Encoder und Cliff-Detektoren. Diese Sensoren können auf 1-2mm Distanz exakt hell-dunkel Übergänge auf einer Fläche erkennen. Dabei produzieren sie ein analoges Ausgangssignal, welches ansteigt auf dunklen Flächen und wieder abnimmt auf helleren. Diese Eigenschaft wird gepaart mit einer Kodierungsscheibe um die Radachse herum. Diese besteht aus eng beieinander liegenden Schwarz-Weiß-Balken. Richtet man den

[4] http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc2593.pdf das Datasheet des CPUs, abgerufen am 20.07.2019

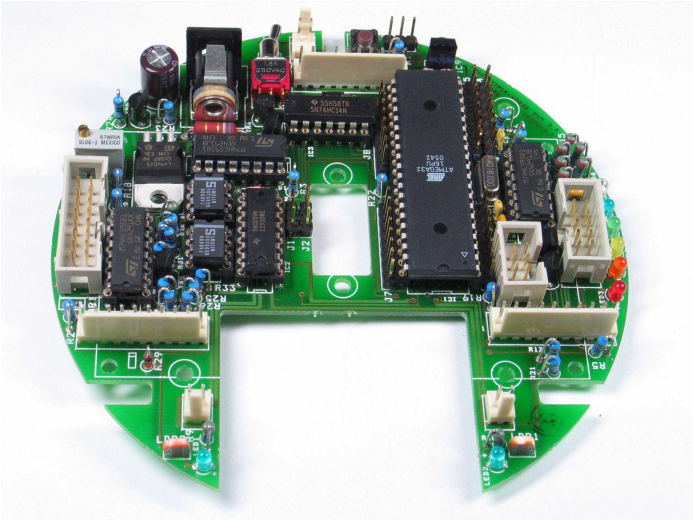


Abbildung 3.2: Mainboard

CNY70 danach aus, so erkennt er - bei Bewegung des Rads und der Kodierungsscheibe - die Wechsel. Diese nennt man Ticks. Ein guter Tick-Wert für ein Rad mit 3cm Radius wären mehr als 200 Ticks. Der Ct'Bot hat 64. Diese werden mit dem CNY70 in der vorgegebenen Konstruktion kaum erreicht, da der Sensor sehr empfindlich auf Umgebungslicht reagiert und zu weit vom Rad entfernt sitzt.
Das gleiche Problem ergibt sich bei den Cliff-Detektoren. Das sind CNY70-Sensoren an der vorderen Roboterseite. Sie blicken Richtung Boden und sollen erkennen, wenn der Roboter sich über einem Abgrund befindet. Leider waren die Sensoren zu hoch angebracht und lieferten daher fehlerhafte Werte.

Motor

Der Ct'-Bot wird von 2 Faulhaber 2619 SR 006 Gleichstrom-Motoren bewegt. Sie werden mit 6 V betrieben und erbringen ausreichend Leistung um den Ct'Bot zu bewegen.[5] Sie haben ein eingebautes Getriebe mit 33:1 Übersetzung und erreichen so 30 mNm Drehmoment im Dauerbetrieb.

Distanzsensoren

Als Distanzsensoren dienen zwei Infrarot-Distanzsensoren GP2D12 von Sharp.[6] Sie haben einen Messbereich von 10-80cm und arbeiten mit Infrarot-Strahlen. Dies ermöglicht eine punktgenaue Messung mit zuverlässigen Werten. Jedoch sind die Sensoren störanfällig gegenüber Materialoberflächen, [Nü12]. So können gemessene Daten stark voneinander abweichen, je nachdem auf welche Fläche sie treffen. Ebenso von Nachteil ist der hohe Stromverbrauch und die fehlende Abschirmung

[5] *https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/DE_2619_SR_DFF.pdf*, Datasheet abgerufen am 20.07.2019

[6] *https://engineering.purdue.edu/ME588/SpecSheets/sharp_gp2d12.pdf*, Datasheet abgerufen am 20.07.2019

der Sensoren. Ihre Platine ist ungeschützt und frei liegend zur Rückseite.
Der auf dem Bild dargestellte Sonar-Sensor wurde nicht mehr aufgefunden und wird daher nicht als vorhandene Sensorik geführt.

Kompass

Für die Messung der Ausrichtung wurde dem Ct'Bot nachträglich ein Kompass von Devantech installiert. Der CMPS03 hat eine Genauigkeit von 3-5 Grad und misst in Bezug zum Nordpol. Die exakte Kalibrierung des Kompasses ist äußert mühsam und wurde von [Hof11] in seiner Doktorarbeit beschrieben. Ebenso hatte dieser wiederholt Probleme mit der Genauigkeit der Messungen.

Optical-Flow Sensor

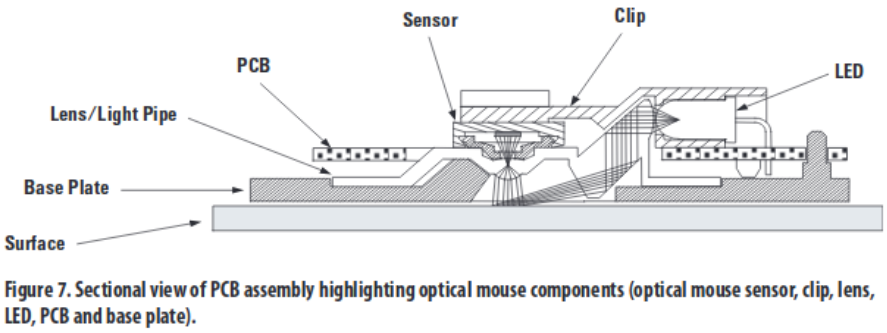


Abbildung 3.3: ADNS 2610 Skizze aus dem Datasheet

Als weiteren Odometrie-Sensor hat der Ct'Bot einen ADNS-2610 Optical-Flow-Sensor von Avago verbaut. Der Optical-Flow-Sensor ist im hinteren Teil des Roboters angeschraubt und in der Werksausführung zu weit vom Boden entfernt, so dass er keine korrekten Werte liefert. Wird der Sensor tiefergelegt, so misst er den Fluss von Pixeln in schnell hintereinander aufgenommen Bildern und berechnet daraus eine Veränderung der Lage. Dies erfolgt mit einer Auflösung von 0,635 mm (400 Counts Per Inch, CPI) [7] und somit sehr exakt.

LCD

Es wurde zusätzlich ein DEM20485 LCD von Ryston verbaut. Leider war dieser nicht mehr funktionstüchtig. Es existierte ein Fehler, welcher die Darstellung von Charaktern im unteren Feld nicht ermöglichte.

[7] https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Avago%20PDFs/ADNS-2610.pdf, Datasheet abgerufen am 20.07.2019

Kamera

Der Ct'Bot verfügte über ein Kamera-Modul. Diese konnte Bilder in der Auflösung von ... erstellen. Leider ist der Speicherplatz des Ct'bot hierfür nicht ausreichend, sodass eine zusätzliche SD-Karte eingebaut werden. Der Ct'Bot konnte auf die SD-Karte nur Speicher- und Sendebefehle ausführen, jedoch nicht weitere Programme abspeichern. Daher war eine Bildbearbeitung auf dem Ct'Bot nicht möglich.

verschiedene Chips

Ein Wlan-Modul von Lantronic ermöglichte die Kommunikation mehrerer Ct'Bots miteinander. Die Funktionstüchtigkeit des Moduls konnte nicht überprüft werden.
Das SD-Karten-System ist ein für den Ct'Bot entwickeltes Modul und kann 512 Byte pro 5ms (also 0,1MB/s, die Raspberry Pi 3 hat im Vergleich eine durchschnittliche Schreibgeschwindigkeit von 20-50MB/s, abhängig von der eingesetzter Karte, eine SSD etwa 500-3500MB/s) schreiben. Beim Schreiben und Lesen wird auf der Karte kein Fat32 Format verwendet, sondern ein selbstgeschriebenes Format genutzt. Dies verzichtet auf ein spezielles Dateisystem und nummeriert die Blöcke durch. Diese werden nun von vorne beginnend geschrieben. Ein Zugriff beginnt daher immer am ersten Block und iteriert bis zur gesuchten Nummer durch die ganze Karte. Große Karten verzögern dabei den Zugriff enorm. Ein praktischer Nutzen für moderne Systeme ist dadurch nicht mehr gegeben.

Grundplatte

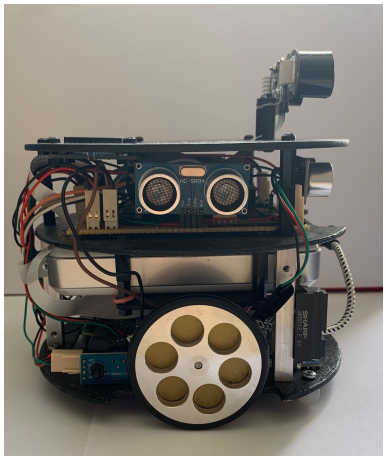
Eine Aluminium-Platte mit einem Durchmesser von 12 Zentimetern bildet die Grundplatte. Der ganze Ct'Bot ist so konzipiert, dass diese Grundplatte modular erweitert werden kann. Jedes neue Modul wird hierbei auf die bisher oberste Platte aufgeschraubt. Dadurch wächst der Roboter in die Höhe und behält seine Grundform bei. Zur Grundausstattung gehörte die erste Ebene und das Mainboard. Alle weiteren Erweiterungen waren spezielle Zukaufteile oder mussten selbst entwickelt werden.

Fehlende Bauteile

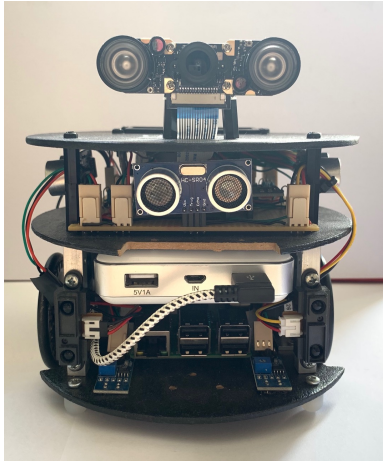
Nicht mehr vorhanden waren das Batteriefach, ein PC-Kabel (9-Poliger D-Sub-Stecker, leider kein Anschluss an moderne Rechner möglich da dies ein überholtes Format ist), die Fernbedienung und der Ultraschall-Distanzsensor.

3.1.2 Neue Hardware

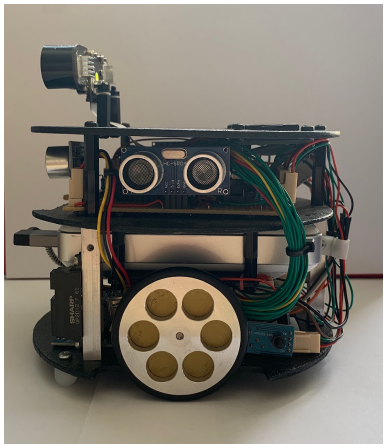
In diesem Abschnitt wird die neue Hardware, mit einer kurzen Begründung warum diese ausgewählt wurde, vorgestellt



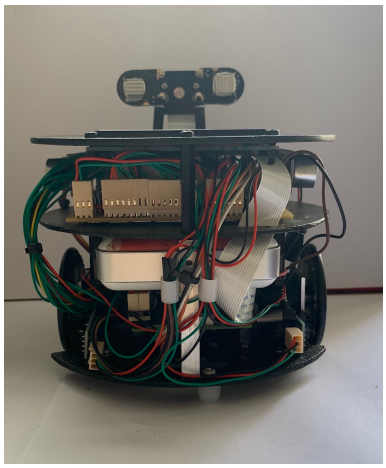
(a) Seitenansicht rechts



(b) Frontansicht



(c) Seitenansicht links



(d) Rückseite

Abbildung 3.4: Der fertige PyBot

Hauptplatine

Der bisherige CPU wird für die künftigen Aufgaben nicht leistungsstark genug sein. Als Alternative würde sich erneut ein ATmega anbieten, wie z.B. der ATmega328P. Dieser ist auf dem Arduino Uno verbaut und kostet als Einplatinen-Computer 20Euro. Er bietet die Möglichkeit digitale und analoge Pins anzusteuern und hat eine ausreichend starke Rechenleistung. Jedoch ist hier, ebenso wie bisher, der Speicherplatz mit 32kB begrenzt. Für komplexere Projekte empfiehlt sich daher eine Raspberry Pi 3B.[8] Mit einem Preis von ca. 35 Euro ist sie zwar teurer, erlaubt aber den Speicherplatz variabel zu vergrößern. Zusätzlich ist sie - in Verbindung mit Raspbian - ein vollständiger Stand-alone-PC und erlaubt so die Verwirklichung von hochkomplexen Steuerungen oder Algorithmen. Weitere Vorteile sind ihre kompakte Größe, ihre leichte Programmierbarkeit und der niedrige Stromverbrauch.
Die Pi hat den Nachteil, dass sie keine analogen Eingänge besitzt. Dies muss über einen Analog-Digital-Konverter (ADC) kompensiert werden.
Weitere Möglichkeiten wären ein Asus Tinker Board, Banana Pi, BeagleBoard oder HumminBoard. Diese bieten meist gleiche bis etwas mehr Ausstattungsmerkmale als die Pi, kosten jedoch bis zu drei Mal so viel.

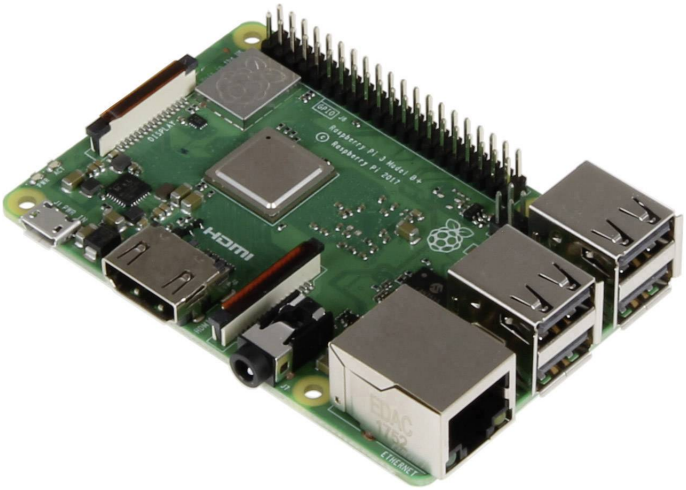


Abbildung 3.5: Raspberry Pi - offizielles Bild des Herstellers

Die Raspberry Pi 3B+ hat einen Broadcom Chip mit 1.4GHz, 1GB SDRAM, eingebautes Wlan und Bluetooth, ein Ethernet-Stecker, 4 USB-Ports, einen Stecker für eine Kamera, HDMI-Ausgang, einen Micro-SD Steckplatz und 40 programmierbare Pins für digitale In- und Outputs. Sie wird mit 5V betrieben. [9]
Diese Spezifikationen sollten für unsere Software-Anforderungen ausreichen.

Abbildung 3.6: Raspberry Pi Nachtsichtkamera der Firma Kuman - offizielles Bild des Herstellers

Kamera

Die bisherige Kamera lässt sich nicht an die Pi anschließen. Sie wird durch eine Raspberry-Pi Kamera ersetzt. Hierbei wird nicht die übliche Ausführung gewählt, sondern eine mit kontrollierbarem Infrarot-Filter. Durch diese Option ist es der Kamera möglich, auch in völliger Dunkelheit Bilder aufzunehmen. Die Kamera der Firma Kuman hat eine Auflösung von 2592×1944 und einen manuell verstellbaren Fokus. Dies senkt die Kosten, muss aber bei der Einstellung mit bedacht werden. Weiterhin hat sie seitliche Infrarot-LEDs um den Infrarot-Filter bei Tageslicht zu kompensieren. Ohne diese LEDs würden die Bilder der Kamera in einer hellen Umgebung einen sehr hohen Anteil an rot-Werten aufweisen, welche eine übliche Kamera nicht hätte. Diese Besonderheit muss bei einer weiteren Bildverarbeitung mit eingeplant werden, da trotz der LEDs die Bilder erhöhte Rot-Werte aufweisen.

Akku

Der Ct'Bot wurde von einem Akku-Pack betrieben, welcher aus zusammengeschlossenen AA-Batterien bestand. Hiervon waren 6 nötig. Dies begrenzte die Flexibilität und wird daher durch eine handelsübliche Powerbank ersetzt. Diese sollte mindestens 10.000mA haben, um eine Laufzeit von mindestens 6 Stunden zu gewährleisten [10]. Weiterhin ist darauf zu achten, dass sie über ein USB-Kabel angeschlossen werden kann.

[8] Ende Juli wurde die neue Raspberry Pi 4 vorgestellt. Leider war zu diesem Zeitpunkt der Roboter fertig gestellt, so dass ein Tausch erst nachträglich möglich wurde. Daher galt für den Zeitpunkt der Bearbeitung die Raspberry Pi 3B als neueste Version.

[9] Daten aus dem Datenhandbuch, Bild von der Offiziellen Website

[10] diese Zeitangabe bezieht sich auf aktive 6 Stunden Fahren und Applikationsausführung, inklusive eines Video- und VNC-Streams

Wheel-Encoder

Die bisherigen Wheel-Encoder waren unzuverlässig. Ihre Fehlerquote an verpassten Räder-Ticks war nicht korrekt messbar, da sie von 64 Ticks höchstens die Hälfte erkannten und somit ein korrekter Testablauf kaum möglich war. Sie wurden durch eine verbesserte Variante des CNY70 ersetzt. Die neuen Wheel-Encoder sind TCRT5000 Chips. Ihr Messprinzip ist entspricht dem des CNY70. Verbessert sind jedoch die Reaktion auf einen Input, das Hinzufügen eines digitalen Ausgangs, die absolute Distanz auf die gemessen werden kann wurde auf 2cm erhöht und eine Regulierbarkeit der Jump-Spannung ist nun gegeben, d.h. der benötigte Hell-Dunkel-Unterschied der Übergänge kann manuell eingestellt werden. Die neuen Sensoren erkennen nun zuverlässig die Räder-Ticks, leiden aber weiterhin an den grundsätzlichen Problemen der Rad-Odometrie.

Distanzsensoren

Die GP2D12 werden heute noch in neuere Systeme verbaut. Es besteht kein Grund diese auszutauschen.

Abbildung 3.7: Ultraschall-Sensor HC-SR04

Der Roboter wird um drei Ultraschall-Distanz-Sensoren HC-SR04 erweitert[11]. Diese erlauben eine Abschätzung der Distanz auf 10-60cm. Zu beachten ist, dass die Ultraschall-Distanz-Sensoren einen breiten Streubereich haben, welcher sich kegelförmig vom Sensor im Raum ausbreitet, [Sch12]. Während die Sharp-Sensoren punktgenau messen, misst ein Ultraschallsensor eine ganze Fläche ab und erhält dabei stets die kleinste gemessene Distanz.
Weiterhin problematisch ist bei Ultraschall, dass die Sensoren miteinander interferieren können, [Nü12]. Dies tritt insbesondere dann zu tage, wenn der Roboter sich auf engstem Raum bewegt. Daher dienen diese Sensoren tatsächlich nur der Abschätzung und um die bisher unerfassten Bereiche links und rechts vom Roboter zu messen.

[11] https://www.mikrocontroller.net/attachment/218122/HC-SR04_ultraschallmodul_beschreibung_3.pdf, Datasheet abgerufen am 20.07.2019

Gyroskop

Die Ungenauigkeit des Kompasses macht es nötig einen Ersatz zu suchen um die Ausrichtung des Roboters zu messen. Hierfür bieten sich kostengünstige MPU6050 Sensoren an[12]. Diese können Drehungen und Beschleunigungen an der x-,y- und z- Achse bestimmen. Ihre Genauigkeit beträgt dabei 1-2 Grad für die Drehung. Sie verfügen über ein I2C-Kommunikations-Interface und können darüber an die Pi angeschlossen werden. Der Gy-521 MPU 6050 ist ein fertiges Modul, welches den Chip von InvenSens auf einer PCB mit den nötigen Anschlüssen vereint. Für ihn spricht insbesondere sein Preis und die kleine Bauform.

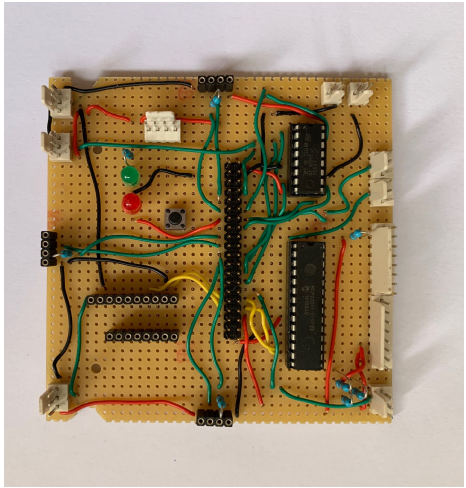
Grundplatte

Die alte Grundplatte ermöglichte leider nicht den Einbau der Pi und der Powerbank in liegender Position. Daher wurde die sie von 12 auf 15cm Durchmesser erhöht. Dadurch war auch ein verbesserter Einbau der Cliff-Sensoren und des Optical-Flow-Sensors möglich. Dieser sitzt nun im Mittelpunkt auf der Grundplatte und macht eine Transformation seiner gemessenen Daten auf den Roboter-Ursprung unnötig. Dies spart komplexe Matrix-Berechnungen im Software-Framework und damit Rechenzeit.

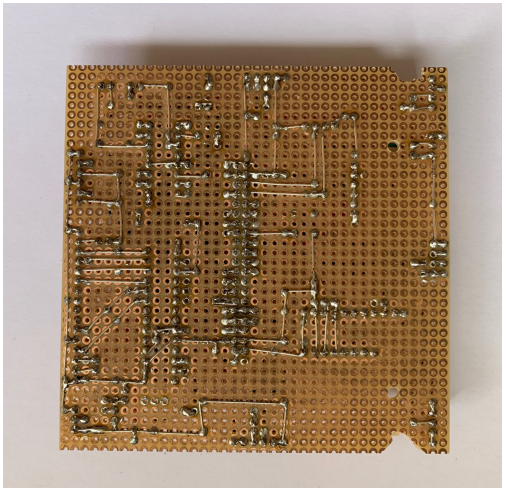
Sensorplatine

Die Sensorplatte fasst alle Sensoren zusammen. Diese haben keinen Platz mehr auf dem Motherboard der Pi. Das alte Board konnte durch die Erweiterung nicht wiederverwendet werden. Daher wurde eine neue Sensorplatte entworfen, welche nun die mittlere Schicht des Roboters bildet.
Grundlage der Sensorplatte ist eine 2.5-Punkt-Raster-Lötplatine. Auf dieser wurde der Schaltplan durch Kupferlitzen und Silber-Kupfer-Draht realisiert und die Sensorik über Pin-Stecker direkt auf der Platte installiert. Diese Lösung erlaubt einen schnellen Austausch von Sensoren und bietet eine Erweiterbarkeit auf die freien Pins an. Sensoren außerhalb der Platine wurden über Kupferlitzen und das PSK-Steckersystem eingebunden. Hierbei wurde ein einfacher Farbcode für die Leiter implementiert,so dass ein Tausch von Sensorik oder eine Fehlersuche im Kabelmanagment erleichtert wird. Für die Fehlersuche wurden zwei Zustands-LEDS verbaut. Dabei signalisiert die grüne einen fehlerfreien Zustand und die rote LED leuchtet beim Aufruf jedes Python-Error-Exceptions.

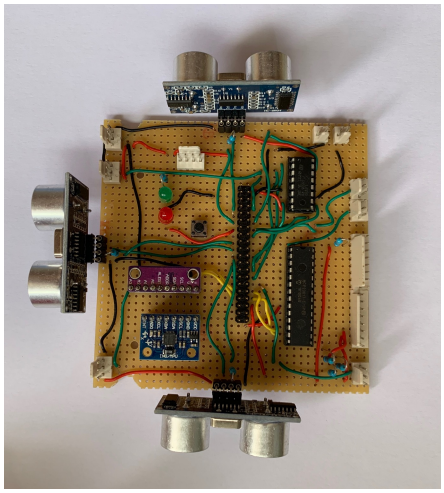
[12] https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf, Datasheet abgerufen am 20.07.2019



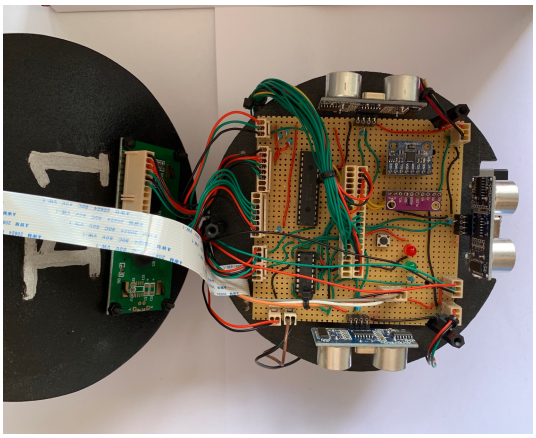
(a) Draufsicht auf die Sensorplatte



(b) Sicht auf die Lötstellen



(c) Bestückte Sensorplatte



(d) Verkabelte Sensorplatte

Abbildung 3.8: Die fertige Sensorplatte

3.2 Software-Framework

Ein Software-Framework soll die einfache Bereitstellung von Funktionen bieten. Das Roboter-Framework ermöglicht so, dass ein Anwender die Treiber für die Sensorik nicht selbst schreiben muss, sondern sich die benötigten Daten vom Framework bereitstellen lässt. Dies erlaubt ein schnelles Entwickeln von Anwendungen für den Roboter ohne ein explizites Management der Hardware-Funktionalität.

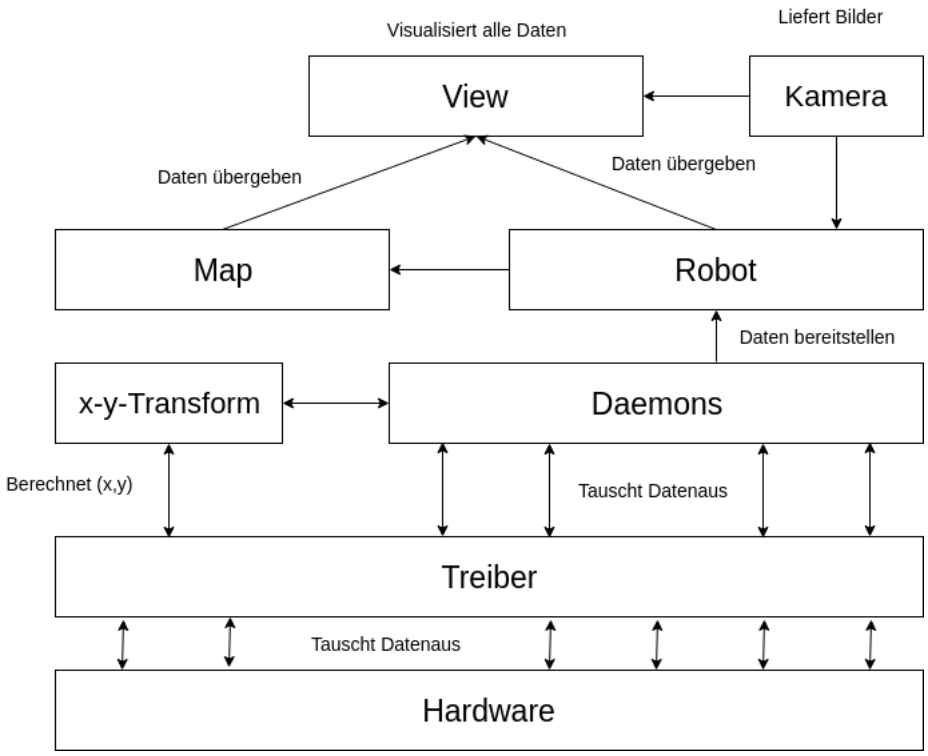


Abbildung 3.9: komplettes Framework

3.2.1 Python

Das entwickelte Framework nutzt als Sprache Python. Python ist ursprünglich als reine objekt-orientierte Skriptsprache zum Ausführen kleiner Aufgaben und Funktionen entwickelt worden. Mit Python 2 wurde die Funktionalität der Sprache so erweitert, dass sie nun die gleichen Projekte realisieren kann, die auch andere Hochsprachen verwirklichen.
Python erlaubt kleine Skript-Dateien miteinander zu kombinieren und ermöglicht damit, größere Programme 'zusammen zu bauen'. Diese Modularität erklärt die Popularität von Python. Weiterhin lässt sich Python-Code auf allen Betriebssystemen direkt ausführen und muss nicht maschinen-bezogen programmiert werden.
Python gilt auch als natürliche Sprache der Pi. Diese erlaubt die gesamte Steuerung des Rechners über Python-Skripte. Daher gibt es innerhalb der Pi-Community im Internet eine große Datenbank fertiger Skripte, welche die Programmierzeit erheb-

lich verkürzten, da nicht jede Funktionalität selbst programmiert werden muss.
In diesem Projekt wird Python 2.7 verwendet, weil dies hoch skalierbar auf Python 3.x ist. Der Weg von 3 auf 2.7 jedoch nicht möglich ist. Damit wird die Funktionalität des Frameworks auch für ältere Pi Modelle gewahrt.

3.2.2 PyBot- Framework

Das PyBot-Framework wurde speziell für diesen Roboter entwickelt, lässt sich jedoch auf ähnliche Roboter umschreiben. [13] Es ist eine Sammlung von Skripten, welche die Steuerung aller nötigen Sensorik übernimmt und als Funktionen und Klassen dem Nutzer zur Verfügung stellt. Den Kern bildet die PyBot-Klasse. Über diese ist ein einfacher Zugriff auf die Sensorik genauso möglich wie die Steuerung der Motoren. Daneben erlaubt die View-Klasse ein interaktives Steuern des Roboters über ein einfaches grafisches Nutzer-Interface (GUI).

3.2.3 Hardware Treiber

Die Treiber für die Sensorik wurden entweder komplett selbst geschrieben oder - falls vorhanden - vom Hersteller bezogen und angepasst [14]. Hierbei lag der Fokus der Software-Entwicklung in einer ausfallsicheren und genauen Verwertbarkeit der Daten. Dazu wurden für alle Abfragen Time-Outs festgelegt, welche endlos-Schleifen verhindern und bei Bedarf die Abfragefolge komplett neu starten. Weiterhin sind Korrektheitstest implementiert, welche unmögliche Werte oder Fehlmessungen direkt im Treiber abfangen. Dies erleichtert das Entwerfen von späteren Applikationen, da derartige Werte nicht zurückgeliefert werden.
Die Ausfallsicherheit ist dabei wichtig, weil die Treiber als Daemons im Roboter agieren. Daemons sind Hintergrund-Aktivitäten des Betriebssystems und der Hardware, welche für den Nutzer nicht erkennbar sind. Sie stellen grundlegende Funktionalitäten bereit und müssen stabil gegen mögliche Fehler innerhalb der Hardware sein. Eine fehlerhafte Meldung oder Dateneintrag eines Daemon ist nicht direkt ersichtlich und führt meist zu unerwarteten Abstürzen oder unerkannten Fehlern.
Die Implementierung als Daemon bietet den Vorteil, dass sich der Nutzer keine weiteren Gedanken über die einzelnen Treiber machen muss. Stattdessen werden sie ihm als 'System-Werte' zur Verfügung gestellt und er kann sich auf ihre Korrektheit verlassen.

[13] Näheres im Anhang unter Installation.
[14] Der Analog-Digital-Wandler verfügt über ein Python-Treiber von Adafruit

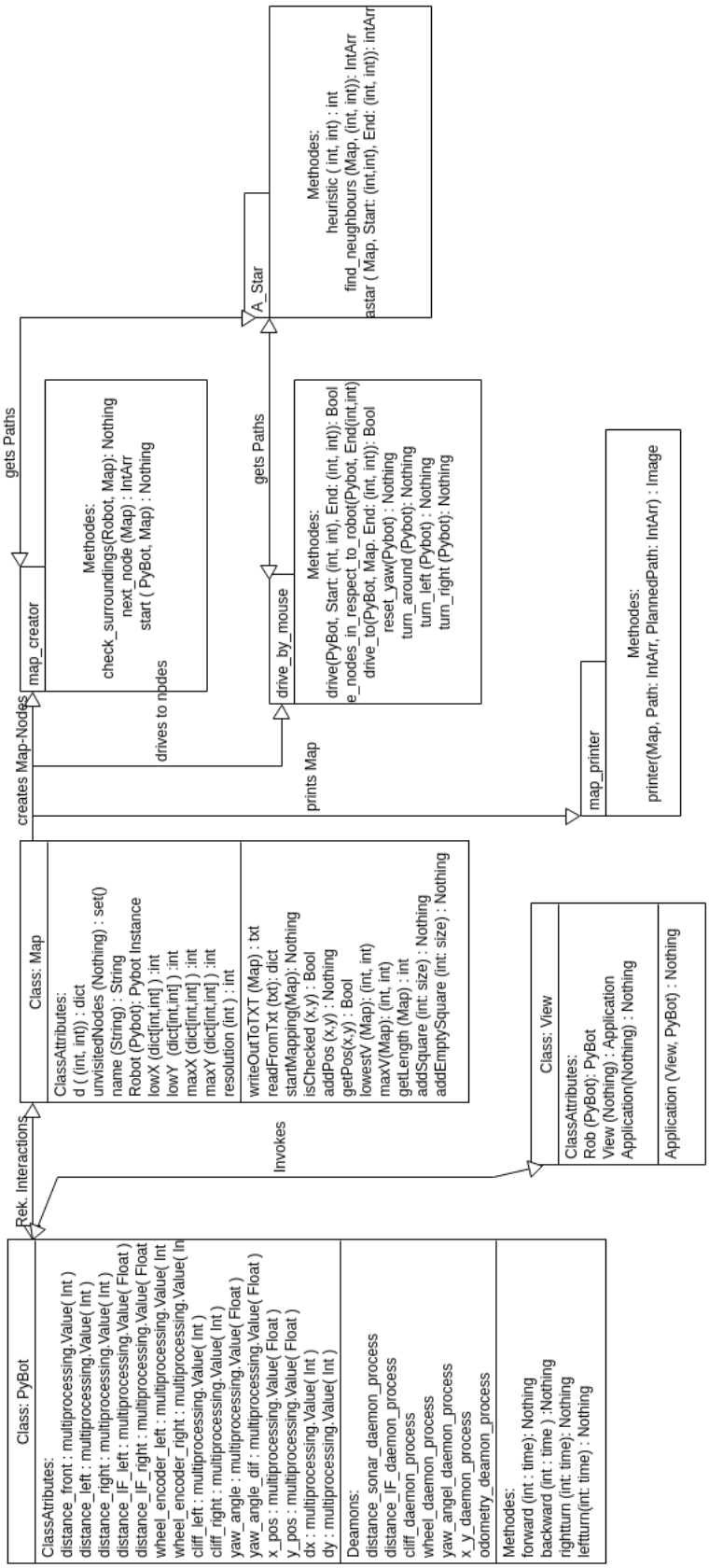


Abbildung 3.10: Framework als UML-Diagramm ohne Sensorik-Daemons

3.2.4 Mapping

Die Karte verwaltet das PyBot-Framework über die Klasse 'Map'. Diese teilt sich in eine Hauptklasse und vier Skripte.
Die Karte ist als Grid-Map konzipiert, d.h. eine vollständige Karte besteht aus n Zellen, welche als Tuple aus (x, y)-Werten angesprochen werden. Diese repräsentieren Koordinaten in der euklidschen Ebene. Jede Zelle besteht aus einem einzelnen Belegt-Wert, welcher entweder 0 - frei - oder 1 - belegt - sein kann. Anhand dieser Informationen kann der Roboter seine Umwelt als Karte abbilden und sich in ihr zurechtfinden.
Die Klasse Map fungiert hierbei als Interface für alle Funktionalitäten bezüglich dieser Karte. Über sie werden alle Prozesse, wie z.B. das Einfügen einer neuen Zelle, die Ausgabe der Karten-Datenbank als Bild oder das Erstellen einer neuen Karte geregelt. Sie ist dabei in der Lage die Karte zu skalieren und das an alle folgenden Skripte weiterzureichen. Die Skalierung wird zentral aus der Roboter-Klasse übernommen und beträgt im Default 1cm [15].
Die Karte selbst wird über das Skript *map_creator* erstellt. Diese bekommt von der Map Klasse die Informationen über die Karte selbst und von der PyBot-Klasse alle Informationen vom Roboter. Auf Basis dieser Daten baut Sie iterativ eine Karte der Roboter Umgebung auf. Dabei verwendet sie eine an [**?**] angelehnte Strategie:

Erstellen der Karte

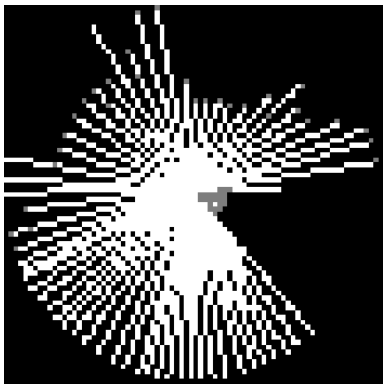
Wird der Roboter angeschaltet, so speichert er seine Position als absoluten Referenzpunkt mit den x,y-Werten $(0, 0)$. Der erste Punkt bildet im folgenden Mapping den Ursprung, von welchem sich die Karte aufbaut.
In der ersten Iteration dreht sich der Roboter einmal vollständig um die eigene Hauptachse. Dabei misst er im Takt von 0.00005s den Abstand mit Hilfe der beiden vorderen IF-Sensoren. Diese Daten interpretiert der Algorithmus nun als Vektor von seiner jetzigen Position mit Länge m und einem Yaw-Winkel ψ. Falls der Vektor eine Länge größer 40cm hat, so wird definiert, dass er auf keinen Gegenstand gestoßen ist. Beträgt die Länger weniger als 40cm, so ist bei m_i ein Gegestand und die jeweilige Zelle besetzt. Da die IF-Sensoren eine Minimaldistanz von 10cm haben, wird jeder Strahl mit einer Messung des Ultraschallsensors begleitet. Dieser kann auf 4cm exakt messen und sollte ein Gegenstand noch näher sein, so liefert der Sensor Fehlermeldungen.
Der einzelne Vektor wird - mit Hilfe des Satzes vom Sinus/Cosinus, [Wir99] - in Zellwerte $(\vec{x, y})$ umgerechnet:

$$x_{\text{end}} = x_{\text{Robot Position}} + m * sin(\psi) \tag{3.1}$$

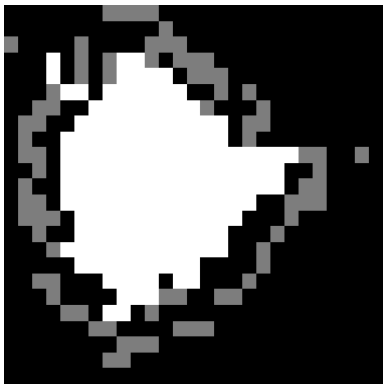
$$y_{\text{end}} = y_{\text{Robot Position}} + m * cos(\psi) \tag{3.2}$$

Jede Zelle welche der Vektor passiert hat, wird in die Kartendatenbank aufgenommen mit dem Wert 0 (frei) und die Zelle am Ende des Vektors als 0(frei), falls der

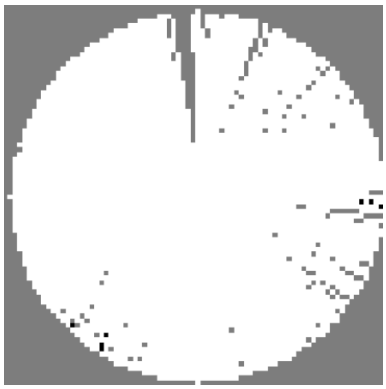
[15] D.h. eine Zelle hat die Maße $1cm \times 1cm$



(a) Eine Iteration mit Takt 0.005 und inversen Farben



(b) Eine Iteration mit Resolution 5cm und inversen Farben



(c) Eine Iteration mit Takt 0.00005

(d) Eine Iteration mit Hindernissen um den Roboter

Abbildung 3.11: verschiedene Karten des Mapping-Algorithmus mit Radius 40cm

Vektor länger als 40cm war oder als 1 (besetzt), falls der Vektor kürzer war als 40cm aber länger als 4cm. Beträgt die Länge des Vektors weniger als 4cm, so ist - theoretisch - keine Aussage möglich und es wird in diesem Algorithmus der Wert auf 1 gesetzt. Dies geschieht aus der Überlegung heraus, dass sich ein Objekt vor dem Sensor befinden muss, es nur unklar ist, wo im Intervall $[0, 4)$ es sich befindet.
Nachdem der Roboter eine Umdrehung getätigt hat, verfügt er über eine kreisrunde Karte seiner Umgebung mit dem Radius 40cm.
Alle freien Zellen werden in einem Python-Set verwaltet. Nach jeder Kreis-Iteration wird das Set gefiltert, so dass keine freien Zellen mehr enthalten sind, welche durch ihre Nachbarn abgedeckt sind oder deren Nachbarn 'Wände' und bereits erkundete Zellen sind. Ziel davon ist es, dass nur die freien Zellen am Rand des Kreises enthalten bleiben, welche nicht durch Gegenstände blockiert werden. Ist das Set nach einer Iteration leer, so weiß der Roboter, dass die Karte fertig erstellt wurde.
Befinden sich im Set noch Knoten, so berechnet der *map_creator* mit einer Heuristik die nächste zu erkundende Zelle. Die Heuristik wählt dabei die Zellen am Rande der x-Achse des zuletzt ausgeführten Kreises, falls dieser mindestens 30cm entfernt liegt. Sollte dies nicht so sein, sucht sie eine Zelle aus dem letzten Kreis, welche diesen Mindestabstand hat. Wird keine gefunden, so wird der nächste freie Punkt

mit höchster Manhattan-Distanz gewählt. Durch diese Heuristik soll eine möglichst schnelle und weite Abdeckung des Raumes erfolgen.
Die Überdeckung einer freien Fläche kann zeit- und bewegungsintensiv werden, wie die Abbildung 3.12: Kreisflächen veranschaulicht. Daher sollte die Heuristik vermeiden, dass zu viele Wege gefahren werden. Die exakte Abdeckung einer Fläche mit Kreisflächen lässt sich genauer durch Algorithmen bestimmen [16]. Diese sind für diesen Zweck jedoch zu rechenintensiv und haben Voraussetzungen, welche nicht erfüllt werden können. So ist die genaue Raumgröße zu Beginn unbekannt, ebenso die Raumaufteilung. Eine Heuristik wie hier muss daher eine grobe Abschätzung bleiben.

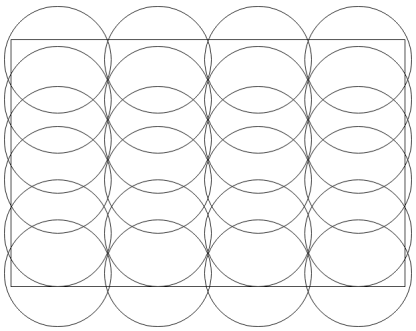


Abbildung 3.12: Kreisabdeckung

Weitere Map Skripte

Die Map-Klasse kann auf einen klassischen A*-Algorithmus zurückgreifen.[17] Dieser operiert schnell auf den verwendeten Python-Dictionarys und Sets. Dabei werden exakte Routen über freie Zellen von einem Start zu einem Endknoten geliefert.
Das Printer Skript visualisiert die Karten-Datenbank für den Menschen. Sie ist dabei in der Lage die Position des Roboters, geplante und beschrittene Pfade mit einzuzeichnen.
Während *Drive_by_Mouse* ein Skript ist, welches die Motorsteuerung innerhalb der Map Struktur übernimmt. Dabei wird auf die PyBot-Klasse zurückgriffen, obgleich dass mit genauen Motorsignalen die Fahrbefehle auf Basis der Daten der Roboter-Odometrie erfolgen. Dadurch ist es innerhalb der Map Skripte möglich, dass Befehle wie 'Go to Position (x,y)' realisiert werden können.

3.2.5 View

Mit dem Skript View lässt sich eine einfache GUI aufrufen, welche Betriebssystem und maschinenunabhängig die wichtigsten Funktionen des Roboters grafisch darstellt. Die Darstellung ist zweigeteilt und ermöglicht auf der linken Seite die

[16] wobei hier darauf zu achten ist, dass nicht jede Lösung implementierbar ist. Pack- und Füllprobleme lassen sich meist auf NP-vollständige Probleme reduzieren, womit eine exakte Lösung - in der Realität - nicht möglich ist.

[17] Die genaue Funktionsweise des A*-Algorithmus wird anschaulich bei [Nor12] erklärt.

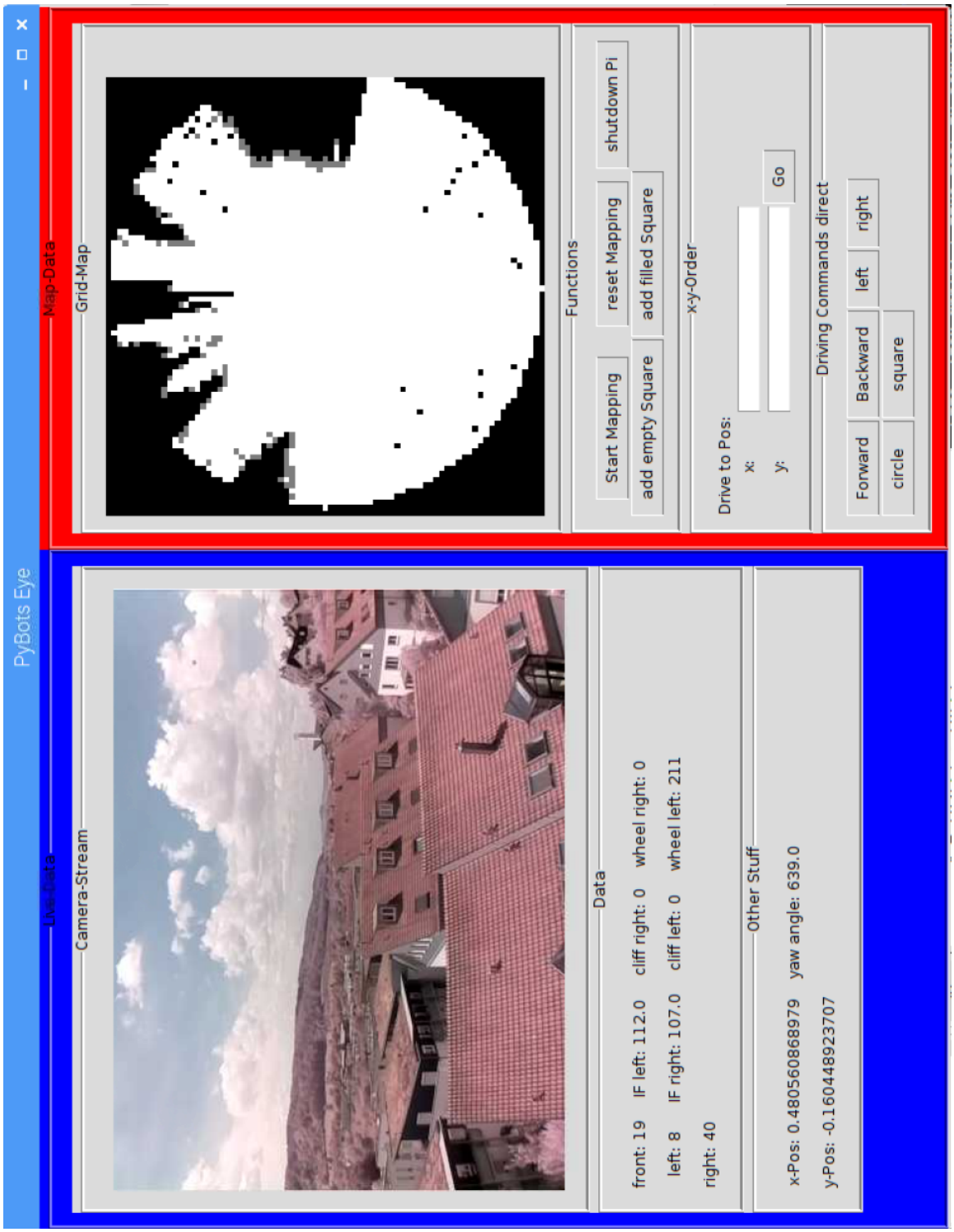


Abbildung 3.13: View-Ansicht

Überwachung der Sensordaten und auf der rechten Seite die Eingabe von Befehlen an die Map-Klasse. Dadurch lässt sich der Roboter schnell und intuitiv steuern.

Kapitel 4

Evaluierung

4.1 Hardware

4.1.1 Roboter Aufbau

Der Aufbau des Roboters wurde vom Ct'Bot übernommen, wodurch bereits vorhandene Nachteile vererbt wurden. So ist es dem Roboter nicht möglich Gegenstände die hinter ihm liegen zu erfassen oder Hindernisse zu erkennen, die seitlich auf ihn zu kommen. Dies muss über die Steuerung geregelt werden. Daher ist ein Rückwärtsfahren ohne vorherige Drehung zum Scannen der Fläche hinter dem Roboter software-technisch verboten.
Ein weiteres Problem liegt in der geringen Bodenfreiheit der Bodenplatte. Diese lagert auf den beiden Rädern, sowie einer Kunststoffkugel vorne und hinten. Durch diese Kugeln kann es passieren, dass der Roboter in Teppichen 'gefangen' wird und nicht mehr aus eigener Kraft fahren kann. Weiterhin ist der Maus-Sensor etwas tiefer als die Bodenplatte angebracht. Dies ist nötig um genaue Messwerte zu erhalten. Dadurch beträgt die Distanz zum Boden in der Mitte des Roboters nur 0.2cm. Besonders bei Unebenheiten im Untergrund hebt die Lippe des Maus-Sensors die Räder vom Boden ab und verhindert so weitere Bewegungen.
Der Einsatzbereich des Roboters schränkt sich hierdurch auf glatte Flächen ein.

4.1.2 Distanzsensoren

Die beiden Sharp Distanzsensoren wurden zu Beginn geeicht. Dies geschieht durch Distanzmessung mit dem Sensor bei bekannter Distanz und notieren der Ausgangsspannungen am Sensor. Dies muss für Distanzen ab 10 cm und dann jeweils um 5cm steigend getan werden. Danach wird eine Funktion an die Werte angepasst. Diese Funktion bekommt die analogen Output-Werte und ermittelt die Distanzen in Zentimetern. Es zeigte sich, dass der Sensor große Ungenauigkeiten liefert, wenn sich die Umwelt ändert. Die Werte variieren bei Veränderung der Temperatur und bei Umgebungslichtwechsel. Eine sehr große Rolle spielte die Fläche, besonders das Material und die Farbe, auf die der IF-Strahl traf. Dies bewirkte Fehlmessungen von bis zu 10cm. Kaum zu kontrollieren waren Farbwechsel auf kleinsten Flächen. Im Da-

tasheet von Sharp wird dies explizit erwähnt und jede Messung hier ausgeschlossen:[1]

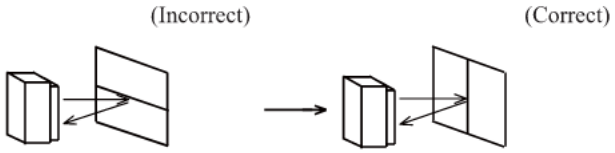


Abbildung 4.1: Sharp Anleitung zu unterschiedlichen Materialien

Diese Einschränkung wurde durch die Software teilweise eingefangen, indem Messwerte mit zu großen Distanzsprüngen ignoriert wurden und eine erneute Messung vorgenommen wurde. Sollte diese den gleichen Wert wie zuvor liefern, so galt das als vertrauenswürdig. Dies verhindert zumindest einen Teil der schlimmsten Messfehler.
Weiterhin erreichte keiner der beiden Sensoren die angegebene Messweite von 120cm. Beim linken Sensor lag die max. Reichweite bei 95cm, beim rechten Sensor bei 112cm. Es zeigte sich jedoch, dass die angepasste Funktion bei Werten über 60cm Schwankungen von bis zu 5cm in der Genauigkeit entwickelte.

Die Ultraschallsensoren hatten keinerlei Probleme mit der Raumform- oder Farbgebung. Sie funktionieren schnell und auf 1cm genau. Der Hersteller der Ultraschallsensoren gibt eine Maximaldistanz von 400cm an. Diese konnte nicht erreicht werden. Die verwendeten Ultraschallsensoren hörten ab 50cm auf zuverlässige Werte zu liefern. Ebenso wurde die Mindestdistanz von 2cm nicht erreicht und man muss mit 4 cm rechnen. Abgesehen hiervon leiden die Ultraschallsensoren an Interferenzen miteinander. Dies passiert vor allem dann, wenn sie auf engstem Raum zeitgleich getriggert werden. In solchen Fällen wurde keinerlei Distanz ermittelt. Innerhalb der Software wird daher jeder Ultraschallsensor nacheinander angesteuert und niemals zeitgleich. Dies verhindert die meisten - jedoch nicht alle - Interferenzen.

4.1.3 Maus-Sensor

Der Maus-Sensor arbeitet auf 0.6mm genau. Dies konnte im Test nicht ganz erreicht werden, jedoch waren korrekte Ergebnisse ab 1cm gegeben. Daher wurde die Auflösung des Roboters und der Karte nie unter diesem Wert gemessen. Der Vorteil des Sensor war, dass sich die Fehler nicht aufsummierten. Jede einzelne Messung war für sich exakt. Zu Problemen führte hingegen der begrenzte interne Speicher des Sensors. Dieser speichert die Differenz der x oder y Bewegung seit der letzten Abfrage als doppelter Hexadezimal-Wert. Dadurch hört der Sensor auf zu arbeiten, falls dieser Wert 127 übersteigt oder unter -128 fällt.[2] Ein sehr schnelles Abfragen der Werte ist unumgänglich, da sonst die Positionswerte nicht mehr stimmen. Die

[1] Aus dem Datasheet des Sensors
[2] Datasheet ADNS2610 Avago, siehe weiter oben

Raspberry Pi war dazu nicht in der Lage, falls der Roboter in voller Geschwindigkeit gefahren ist. Daher wird die Geschwindigkeit gedrosselt, sobald ein Abruf der Positionswerte entweder -127 oder 126 beträgt. Dadurch wird ein Speicherüberfluss im Sensor vermieden.

4.1.4 Gyroskop

Beim Gyroskop stellte sich heraus, dass eine Schwankung von 0.8 Grad im Ruhezustand auftritt. Lässt man den Roboter in einer Ruheposition stehen und misst den Sensor aus, so fällt und steigt dieser kontinuierlich im Intervall $[-0.5, 0.8]$. Dem Datenblatt des Herstellers zufolge, liegen diese Schwankungen im Normbereich und müssen über die Software ausgeglichen werden. Dies wurde innerhalb des Daemons so realisiert, dass dieser erst Veränderungen des Yaw-Winkels übernimmt, die eine Schwelle von 0.8 Grad übersteigen. Daher ist die Genauigkeit der Pose beschränkt. Dies fällt zu Beginn kaum auf, jedoch lässt sich bei der Kartierung beobachten, dass die Winkelfehler sich über die Zeit aufsummieren und bei mehr als 20 Iterationen in der Mapping-Funktion zu Fehlern führen, welche die Karte verzerren.

4.1.5 Diskussion und Bewertung

Die Sensorik ist - trotz des Alters oder der Preisklasse - zuverlässig und ermöglicht innerhalb eines 40-50cm Bereichs eine exakte Vermessung der Roboterumwelt. Bei einem Roboter mit 7.5cm Radius ist dies als ausreichend anzusehen und ermöglicht weitreichende Einsätze und Verwendungen. Die Genauigkeiten bei 1-2 Grad lassen den Yaw-Sensor zu einem Problem werden, falls der Roboter über einen größeren Zeitraum Fehlerwerte aufsammelt. Dies muss mit weiteren Software-Anpassungen berücksichtigt werden.
Eine Verbesserung der Hardware wäre nur mit einem größeren Sprung innerhalb des Preises möglich und würde sich hier nicht rechnen. Die Sensorik erfüllt den erwarteten Zweck mit geringen Einschränkungen in der Steuerung.

4.2 Map

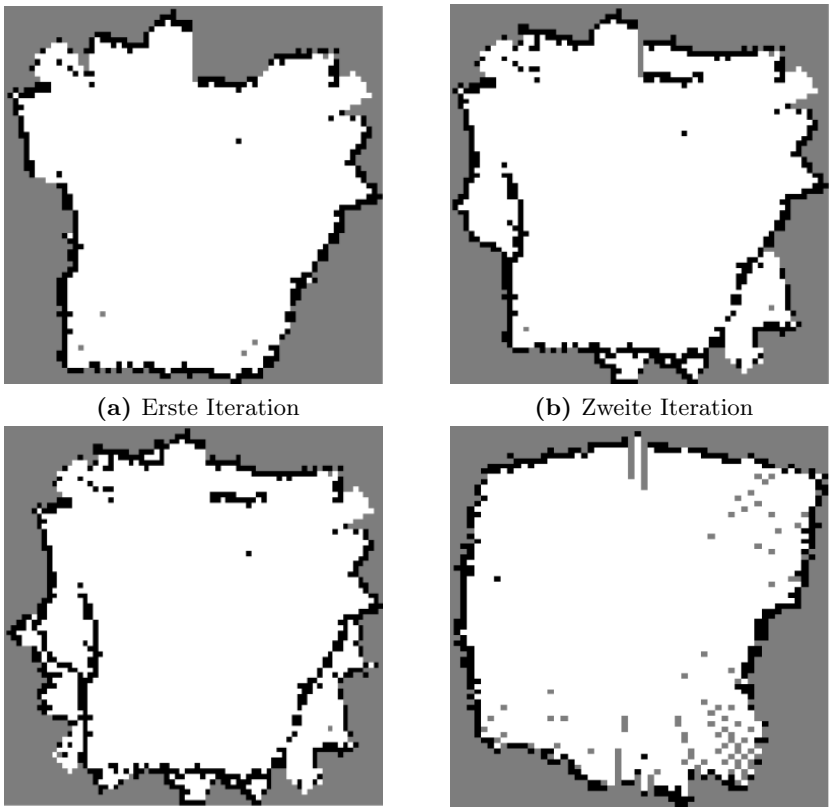
4.2.1 Testumgebung

Die Kartierung wurde in einem $100cm \times 100cm$ großen, rechteckigen Bereich getestet. Dieser Raum sollte möglichst exakt erfasst werden. Der Raum war dabei frei von Gegenständen.

4.2.2 Ergebnis

Der Roboter brauchte für die Kartierung mehr als 60s Zeit, erreichte bei der ersten Iteration eine ungefähre Karte und erweiterte diese mit jeder weiteren Iteration. Dabei zeigte sich, dass Fehler in der Distanz- und Positionsmessung eine Verzerrung des

Raumes verursachten. Jedoch wurden die Wände erkannt. Beim weiteren Erkunden stellte sich eine Verzerrung der Wandpositionen ein und die Karte wurde weniger genau und enthält Artefakte - Zwischenwände - die nicht vorhanden waren.



(a) Erste Iteration **(b)** Zweite Iteration

(c) Dritte Iteration **(d)** Neuer Versuch

Abbildung 4.2: Karten eines leeren Raums der Größe $100cm \times 100cm$

4.2.3 Diskussion und Bewertung

Der primitive Kartierungs-Algorithmus ist in der Lage die Roboter Umgebung zu erkennen und als Karte aufzufassen. Die Dauer und Genauigkeit kann es nicht mit modernen SLAM-Algorithmen aufnehmen, jedoch erfüllt sie ihre Aufgabe ausreichend. Ein Problem ist die Dauer der Kartierung. Ist die Fläche kleinteilig aufgebaut, so erkennt die Heuristik nicht ausreichend gute Wege und fährt infolge dessen viele Wege mehrfach ab. Dies kostet nicht nur Zeit, sondern verschlechtert mit jeder Iteration die Werte in der Bestimmung der Roboter Pose. Es zeigte sich weiterhin, dass die neuesten Werte die Werte der vorherigen Iterationen fehlerhaft veränderten und durch aufsummierte Fehler in der Positionsbestimmung Hauptverantwortlich waren für falsche Zellenbelegungen.

4.3 Zusammenfassung

Die Roboter Hardware ebenso wie das Software-Framework funktionieren mit größeren Toleranzen in der Exaktheit. Besonders die ältere Hardware scheint weiterhin nutzbar zu sein und erfüllt die an sie gestellten Aufgaben ausreichend. Viele der Hardware-Probleme können durch Schwellenwerte innerhalb der Software vermindert werden und so zu besseren Ergebnissen führen. Bei der Software zeigte sich, dass der primitive Ansatz keine Karte produzieren kann, welche modernen Maßstäben entspricht. Sie genügte dennoch den eingeschränkten Anforderungen des PyBot, so dass es möglich war, Karten zu erstellen und sich in diesen gezielt zu bewegen.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Der Ct'Bot aus dem Jahr 2006 sollte so modernisiert werden, dass eine erneute Nutzung für heutige Algorithmen und Problemstellungen möglich wird. Das sollte eingerahmt werden mit einem intuitiv zu bedienenden und zuverlässigen Software-Framework.
Die Hardware wurde von Grund auf neu erarbeitet. Beginnend beim Chassis wurde der Roboter erweitert, so dass die Höhe um 10cm reduziert werden konnte und zeitgleich die Funktionalität erhöht wurde. Zudem wurde die komplette Rechnereinheit ausgetauscht und mit zusätzlicher Sensorik erweitert. Damit wurde der Funktionsumfang des Roboters erhöht und zeitgleich die Zielsetzung eingehalten. Dieser kann nun - durch erweiterbare Speicherkapazitäten - schnelle und große Applikationen ausführen. Es sind direkte Bildverarbeitungen auf dem Roboter möglich und eine zusätzliche Basisstation ist nicht mehr nötig. Die neue Kamera liefert hierfür Bilder in ausreichender Qualität und ermöglicht als neue Möglichkeit die Aufnahme von Bildern in völliger Dunkelheit.
Das Software-Framework flankiert diese Erneuerungen. Mit schnellen und robusten Hardware-Treibern, einer Roboter- sowie Map-Klasse ist es möglich direkt Applikationen für den Roboter zu entwickeln, ohne sich um die explizite Steuerung kümmern zu müssen. Der Roboter ist in der Lage, einfache Karten seiner Umwelt zu generieren und sich in diesen zu orientieren. Das Framework ermöglicht eine Pfadplanung für komplexe Wege unter Berücksichtigung der Umwelt, während die View-Klasse einen einfachen Weg bietet, den Roboter in Echt-Zeit mit einer GUI zu steuern und seine Parameter zu überwachen.
Mit dieser Arbeit wurde gezeigt, dass ältere Roboter-Hardware durch verschiedene Erneuerungen, insbesondere an der Hauptplatine, wieder zu einem Arbeitseinsatz befähigt werden können.

5.2 Ausblick

Der neue PyBot kann nun für Aufgaben wie Erkundung und Überwachung von Umgebungen oder für interaktive Applikationen mit anderen PyBots oder Menschen eingesetzt werden. Mögliche Einsatzgebiete wären weiterhin Spiele oder die Lehre, da die Programmierung durch Python schnell zu erlernen ist und kein Vorwissen braucht.
Die Hardware stellt genug Rechnerkapazitäten für heutige Anforderungen bereit. Sollte diese zurückfallen, so wäre ein Austausch der Raspberry Pi durch einen neueren Ein-Platinen-Computer innerhalb weniger Minuten möglich.[1] Es ließe sich zudem die ganze Software mitnehmen, da der Python-Code betriebssystem- und computerunabhängig ist. Die Module sind so gestaltet, dass jede Hardware-Erweiterung mit einem zusätzlichen Python Skript möglich ist. Eine solche modulare Gestaltung erlaubt dem PyBot auch in Zukunft auf dem Stand der jeweiligen Technik zu bleiben. Inwieweit dies auf teurere Industrieroboter zutrifft, wird sich in den kommenden Jahren zeigen. Mit dem Mooreschen Gesetz ist jedem Roboter eine Sanduhr für die eigene Lebenszeit mitgegeben. Wann sich eine Aufrüstung lohnt, muss so im Einzelfall entschieden werden und ebenso die Art und der Umfang den Aufgaben entsprechend angepasst werden. Diese 'Neu-Entwicklung' älterer Roboter könnte sich zu einem eigenen Industriezweig [2] entwickeln und des weiteren einen größeren Beitrag zu mehr Wiederverwertung und Umweltschutz leisten.

[1] So könnte ohne größeren Aufwand die vorhandene Raspberry Pi 3 durch das neue Model 4 ersetzt werden. Hierbei wäre keinerlei Veränderung an der Software notwendig.

[2] Firmen wie Kuka bieten heute schon erneuerte Roboter zum Kauf an. Die Firma Bastian Solutions entwickelt hingegen aus alten Kunden-Robotern neue und schnellere Roboter.

Anhang A

Anhang

Im Anhang wird der Zusammenbau des Pybots erklärt. Neben einer genauen Teileliste werden Baupläne und Installationsanleitungen präsentiert. Dies soll den Leser dazu befähigen, die Konstruktion vollständig nachbauen zu können.
Die komplette Software des Python-Framework findet sich unter https://github.com/Nitzsch/PyBot,[1] ebenso wie eine kurze Einführung in die konkrete Nutzung der verschiedenen Module.

[1] Diese Seite wird vom Autor betreut und wurde mit der letzten Software des Roboters bereitgestellt. Aufgerufen am 30.07.2019

Anhang B

Stück- und Preisliste

In diesem Kapitel findet sich eine vollständige Teileliste. Ebenso sind die einzelnen Bezugsquellen aufgezählt und der Preis. Dieser bezieht sich auf den Privatpersonenkauf ohne jeden Rabatt. Oft wurden 5er Packungen gekauft, da dies den Preis des einzelnen Teils enorm senkt.
Nicht aufgezählt sind die Kosten für Lötzinn und Werkzeug.
Reichelt als Bezugsquelle bezieht sich auf den Online-Elektronikhändler reichelt.de. Dieser bot zum Zeitpunkt dieser Arbeit das beste Preis-Leistungsverhältnis. Gleiches gilt für Amazon, welches sich auf den Onlineversandhandel amazon.de bezieht und die jeweiligen Marktplace-Händler. Keine der Bezugsquellen hat aktiv an der Erstellung dieser Arbeit partizipiert, einen Preisnachlass gewährt oder sonst vom Einsatzzweck gewusst. Beide Web-Stores können durch andere, passendere Bezugsquellen ersetzt[1] werden.

B.1 Vorhandene Bauteile

Bezeichnung	Funktion	Preis in Euro	Bezugsquelle
L293D	Motor-Driver-Chip	0.37	vorhanden
GD2P12	Infrarot Distanz-Sensor	10 (2 Mal)	vorhanden
LCD-Display	Anzeige	8	vorhanden
Opti-Flow-Sensor	Mouse-Bewegungssensor	20	vorhanden
Motor	DC-Motor mit Aufhängung	15	vorhanden
Gummistopper	Unterseite	(3Mal)	vorhanden
330Ohm Res.		0(5Mal)	
2k Ohm Res.		0(2Mal)	
5k Ohm Res.		0	
gesamt:		63.37	

[1] z.B. Aliexpress, Alternate oder Conrad. Die Nennung dieser Händler erfolgt Alphabetisch und steht in keinerlei persönlicher Beziehung.

B.2 Zugekaufte Sensorik

Bezeichnung	Funktion	Preis in Euro	Bezugsquelle
MPU6050	Gyroskop	1.75	amazon
ADS1115	Analog-Digital-Wandler	3.50	amazon
MCP23017	I2C-Multiplex	0.95	reichelt
Ultraschall-	Distanzsensor	1.7 (3Mal)	amazon
TCRT5000	Infrarot-Sensor	1.1 (4Mal)	amazon
gesamt:		15.7	

B.3 Sonstiges Material

Bezeichnung	Funktion	Preis in Euro	Bezugsquelle
Button		0	
LED	Anzeige	0 (2Mal)	
Lochrasterplatte	Sensorboard	0.9	reichelt
4Pin Leiste		0.2 (3 Mal)	reichelt
10 Pin Leiste		0.5	reichelt
8 Pin Leiste		0.4	reichelt
24Pin Dop.-Fed.-L.		0.1	reichelt
16Pin Dop.-Fed.-L		0.1	reichelt
40 Pin Header		0.6	reichelt
2Pin PSK-H		0.1(2Mal)	reichelt
2Pin PSK-H (Fem)		0.1(2Mal)	reichelt
3Pin PSK-H		0.2(3Mal)	reichelt
3Pin PSK-H (Fem)		0.2(3Mal)	reichelt
4 Pin PSK-H		0.2	reichelt
4 Pin PSK-H (Fem)		0.2	reichelt
20 Pin PSK-H (Fem)		0.2 (2Mal)	reichelt
8Pin PSK-H		0.3(2Mal)	reichelt
8Pin PSK-H (Fem)		0.3(2Mal)	reichelt
Crimp-Kontakte	20er Pack	0.3 (min 5)	reichelt
Holzplatte, MDF 4mm	Radius 7.5cm	0.5(3Mal)	Baumarkt
M3 Schrauben	Set mit Abstandshalter	0(40Mal)	amazon
M3 Muttern	Set mit Abstandshalter	0(20Mal)	amazon
Kabellitze	3 versch. Farben	0.76	reichelt
Kabelaufhänger		0.5(3Mal)	reichelt
Gummiband		0	baumarkt
Abstandshalter	Kunststoff, versch. G.	2	amazon
gesamt:		14.06	

B.4 Raspberry Pi und Zubehör

Bezeichnung	Funktion	Preis in Euro	Bezugsquelle
Raspberry Pi	Version 3B +	32.5	reichelt
USB-Kabel	Stromversorgung	3.15	amazon
SanDisk Speicher	Micro-SD, 64GB	15	amazon
Powerbank	12kmA	16	amazon
Pi-Camera	Kamera	7	amazon
Camera Kabel	Kabel	1	amazon
gesamt:		74.65	

B.5 Gesamtpreis

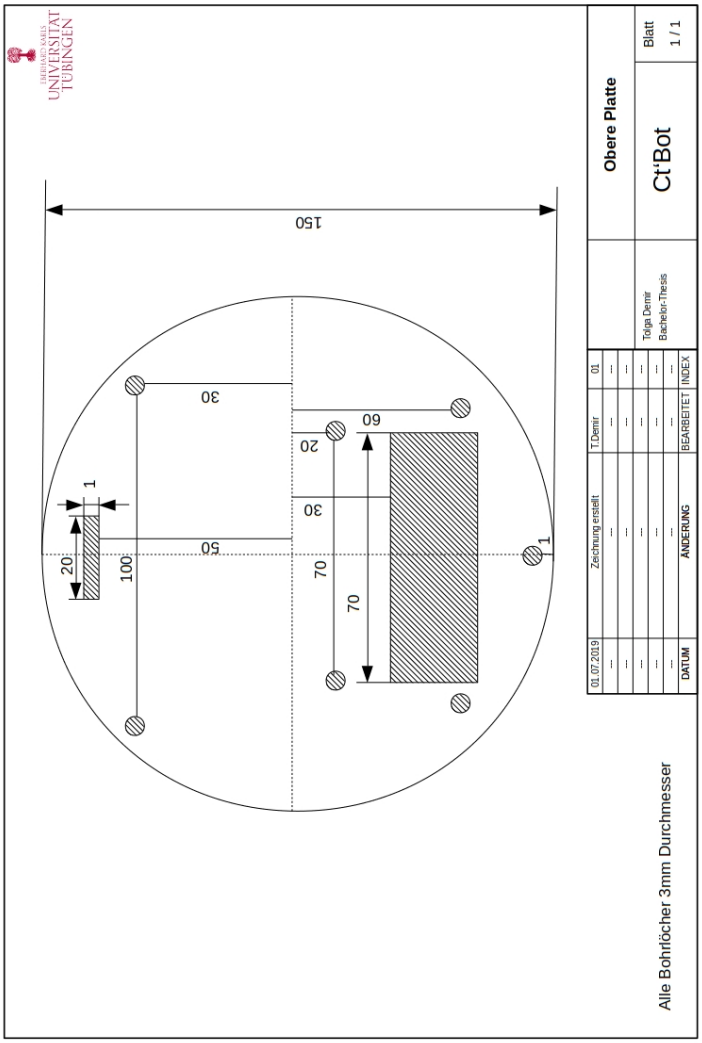
Bezeichnung	Preis in Euro
Sensorik	15.7
Raspberry Pi u. Zubehör	74.65
sonstige Bauteile:	14.06
gesamt:	104.41

Viele Preise beziehen sich auf die reduzierten Angebote mit 5 Bauteilen statt einem. D.h. der Preis von 104.41 Euro pro Stück wird nur realisiert, wenn 5 oder mehr gebaut werden. Ansonsten erhöht sich der Preis uU.
Muss der Roboter vollständig neu gebaut werden (ohne die Basis des Ct'Bots) so erhöht sich der Preis entsprechend um 63.37 Euro auf 167.78Euro.

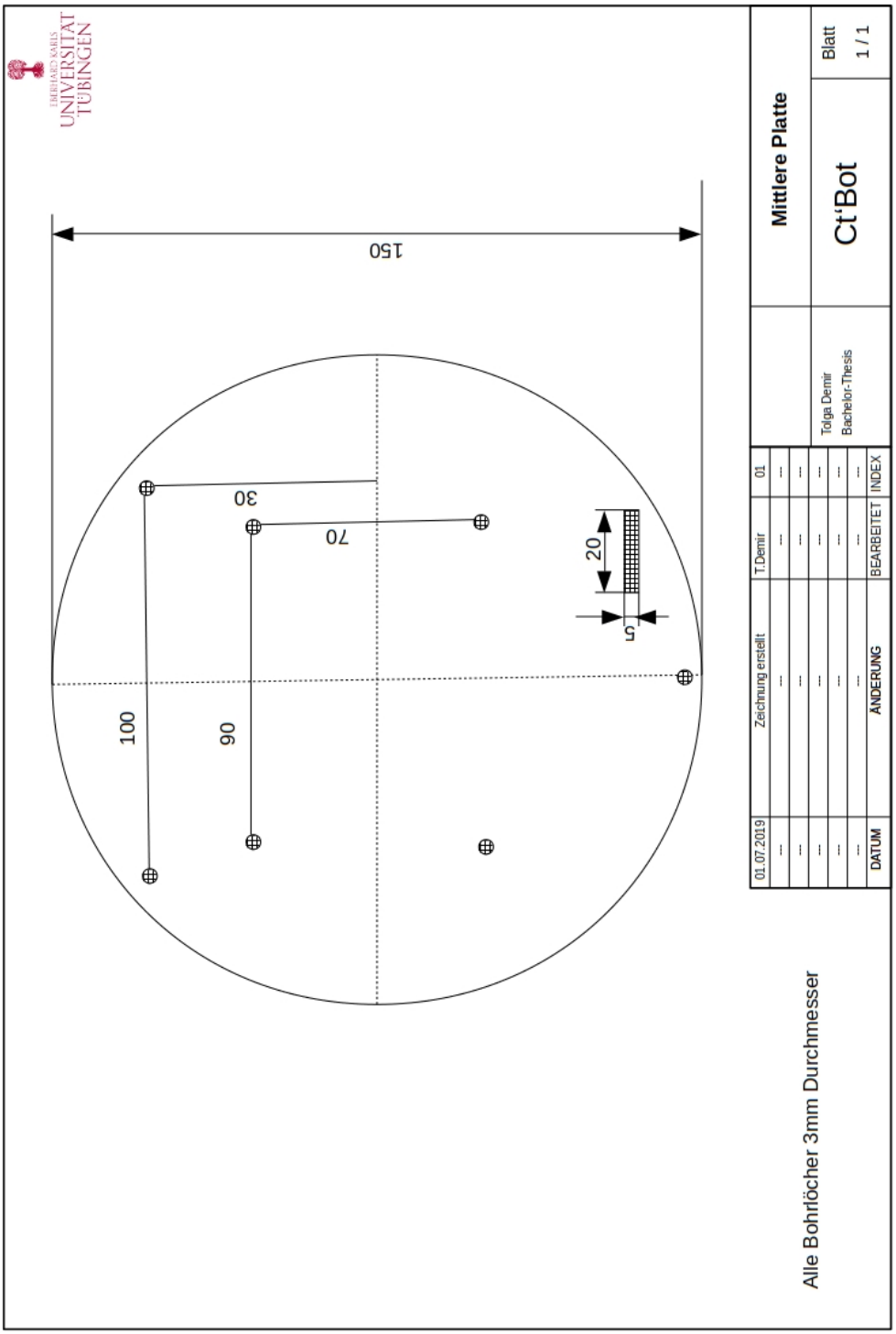
Anhang C

Baupläne

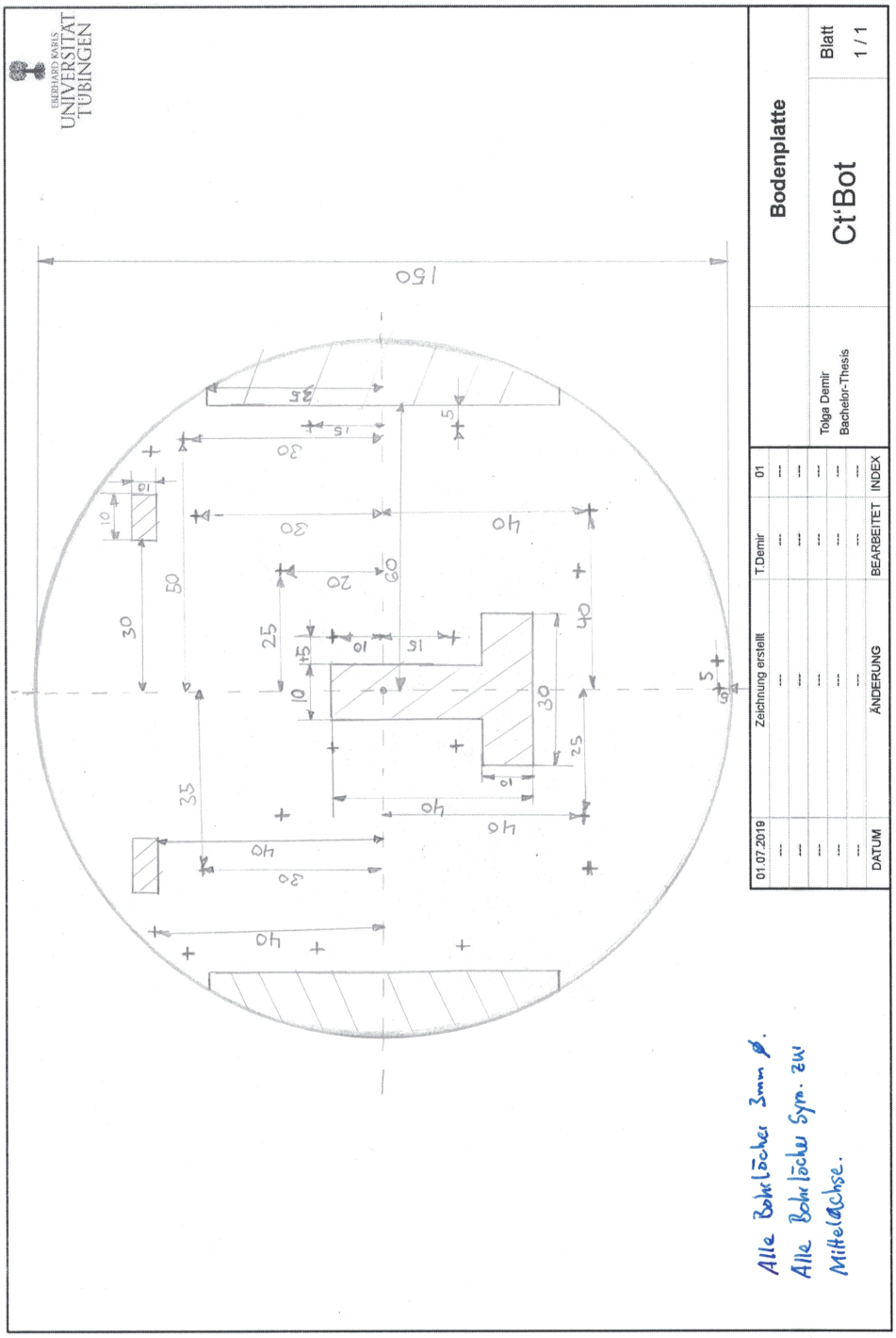
C.1 Obere Platte



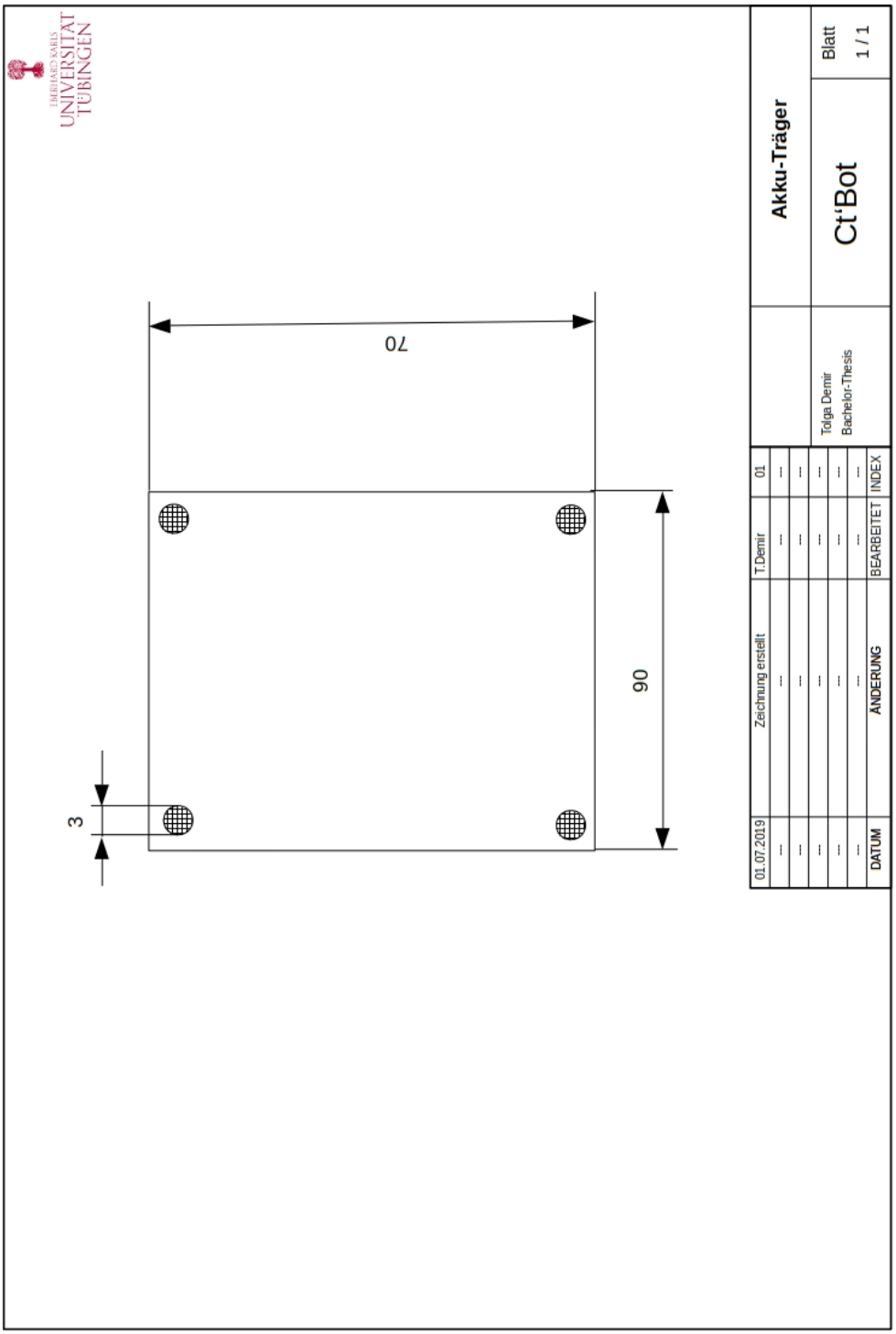
C.2 Mittlere Platte



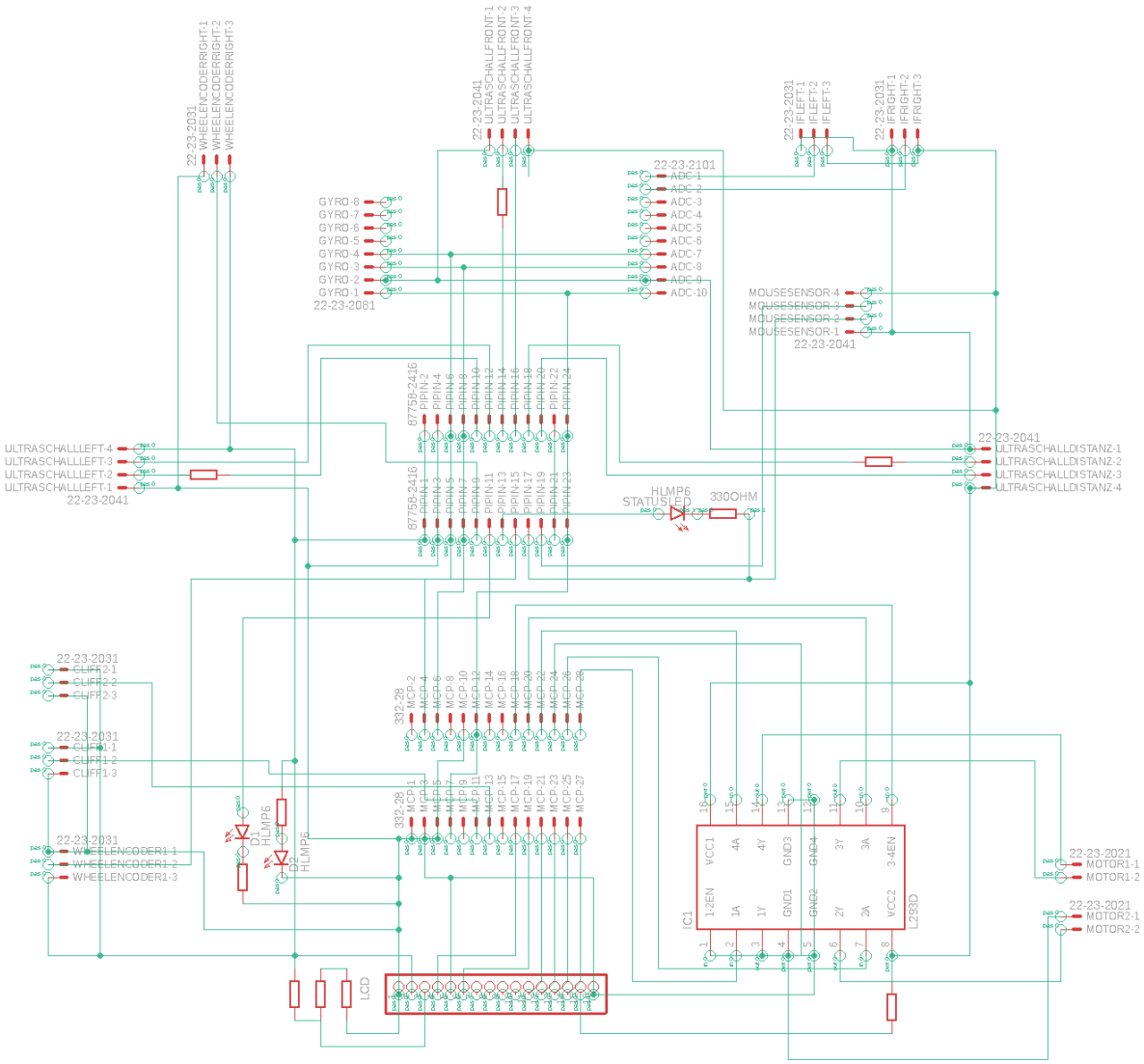
C.3 Bodenplatte



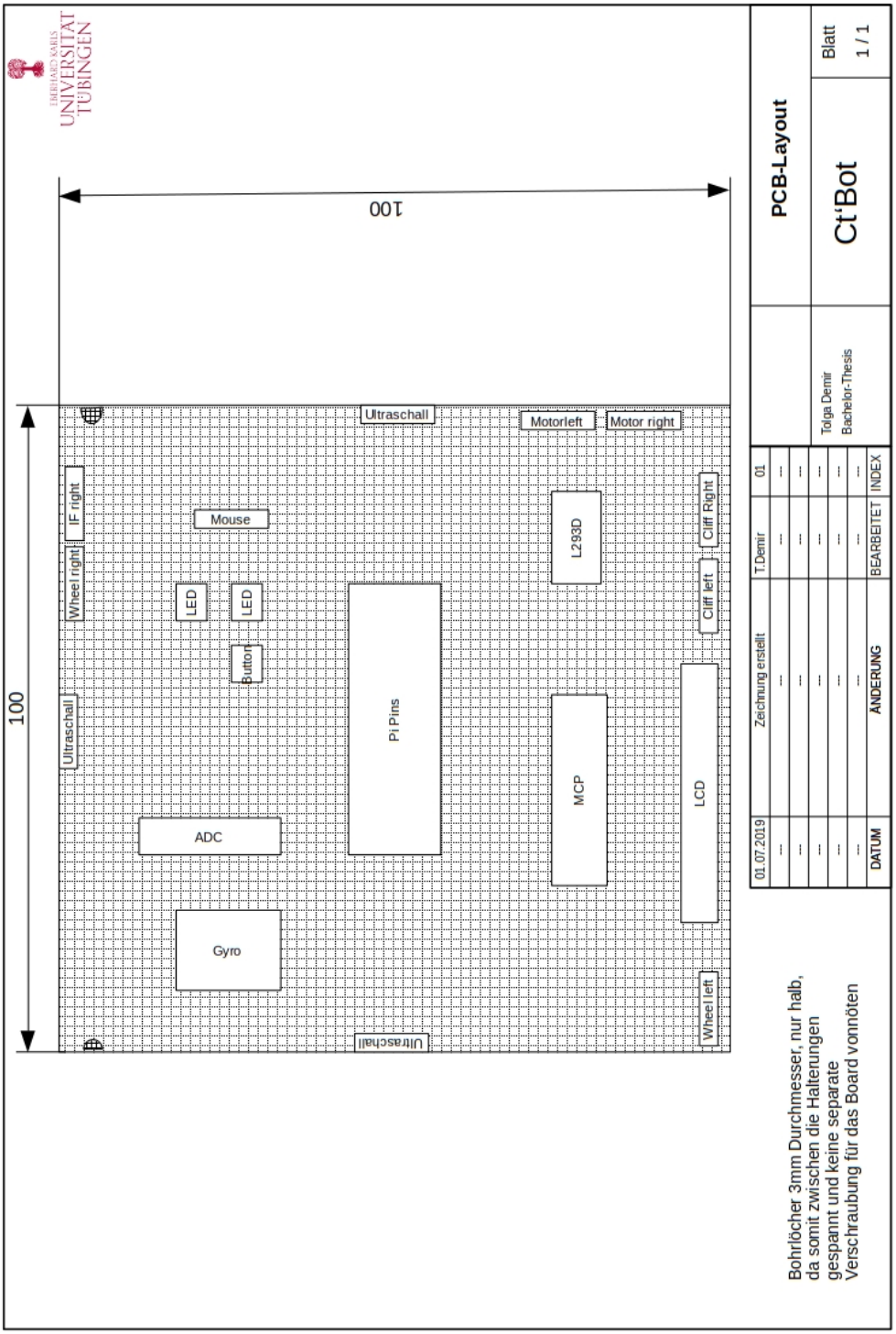
C.4 Akku-Träger



C.5 PCB-Layout



C.6 PCB-Bestückung



Anhang D

Pin-Belegung

D.1 Pinbelegung an der Pi

Pin	BCM	Function	Bauteil
2	3	I2C - SDA	ADC , Gyro, MCP23017 (daran LCD, Buttons)
3	5	I2C - SCL	ADC , Gyro, MCP23017 (daran LCD, Buttons)
4	7	Freier Pin	Ultraschall-Dist-Sens Rechts ECHO
17	11	Freier Pin	Ultraschall-Dist-Sens Rechts TRIG
27	13	Freier Pin	Ultraschall-Dist-Sens Front ECHO
22	15	Freier Pin	Ultraschall-Dist-Sens Front TRIG
10	19	SPI0 - MI	
9	21	SPI0 - MO	Button
11	23	SPI0 - CL	Wheel-Encoder Rechts
5	29	Freier Pin	Ultraschall-Dist-Sens Links ECHO
6	31	Freier Pin	Ultraschall-Dist-Sens Links TRIG
13	33	Freier Pin	Mouse-Sensor Data
19	35	Freier Pin	Mouse-Sensor Clock
26	37	Freier Pin	Status LED
14	8	UART - TXD	intern blockierter PIN
15	10	UART - RXD	intern blockierter PIN
18	12	Freier Pin	
23	16	Freier Pin	Motor-Chip Pin 15 - Driver-In0 for Mot2
24	18	Freier Pin	Motor-Chip Pin 10- Driver-In1 for Mot2
25	22	Freier Pin	Motor-Chip Pin 9 - EN for Mot2
8	24	SPI0 - CE	
7	26	SPI1 - CE	
12	32	Freier Pin	Wheel-Encoder Links
16	36	Freier Pin	Motor-Chip Pin 7 - Driver-In1 for Mot1
20	38	SPI1 - MO	Motor-Chip Pin 2 - Driver-In0 for Mot1
21	40	SPI1 - CL	Motor-Chip Pin 1 - EN for Mot1

Die Pinbelegung orientiert sich an der physischen Verteilung der Pins auf der Pi (BCM-Layout). Vorsicht: Hier wird BCM genutzt, die Python Scripts verwenden

jedoch BOARD-Layout.
Von 24 frei programmierbaren Pins sind 17 in Benutzung, davon 2 für I2C-Kommunikation.

D.2 Pinbelegung am MCP

Die Zählung beginnt am ersten Pin auf der oberen Seite, links. Der erste "freie"Pin ab den Funktions-Pins trägt somit die 1. Danach ist die obere Seite belegt bis 8 und dann wird um das Bauteil herum gehend gezählt. Damit ist der Pin 9 der Pin auf der unteren Seite, ganz rechts und Pin 16 der Pin in der Mitte auf der unteren Seite.

Pin	Bauteil
1 - 6	frei
7	Cliff-Sensor links
8	Cliff-Sensor rrechts
9	LCD D7
10	LCD D6
11	LCD D5
12	LCD D4
13	LCD E
14	LCD RS
15-16	frei

D.3 Pinbelegung am AD-Converter

Pinbelegung wie Aufdruck auf Bauteil, dh. von 0-3, starten ab Mitte.

Pin	Bauteil
0-1	frei
2	IF-Sensor rechts
3	IF-Sensor links

Anhang E

Installationsanleitung

Nachdem die Hardware des Roboters fertiggestellt wurde, muss die Software installiert werden. Dies geschieht durch Installation einer Rasbian Version und dem Einrichten dieser, gefolgt von der Installation verschiedene Python Bibliotheken und dem Framework selbst.

E.1 Raspbian

Raspbian ist eine speziell für die Raspberry Pi zugeschnittene Linux Variante. Grob baut Sie auf Ubuntu auf und verzichtet auf einige der großen Programme und Treiber, insb. jener für Grafik.
Raspbian lässt sich entweder direkt auf einer SD-Karte fertig installiert kaufen oder auf der offiziellen Website
https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/ [1] herunterladen. Für ungeübter User empfiehlt sich hierbei die Noobs Version, welche die neueste Raspbian Version einfach zur Verfügung stellt. Für eine genaue Installationsanleitung empfiehlt sich hier das Einsteiger-Forum von Raspbian https://www.raspberrypi.org/documentation/installation/installing-images/README.md [2] .

E.1.1 Raspbian einrichten

Beim grundsätzlichen Einrichten des Betriebssystems sollte man der Einleitung im oben genannten Link folgen. Es sollte aber auf jeden Fall der Nutzername und das zugehörige Passwort geändert werden. Dies kann über die Konsole mit dem Befehl 'raspi-config' geschehen.

[1] Abgerufen am 01.07.2019 um 14:00 Uhr
[2] Abgerufen am 01.07.2019 um 14:00 Uhr

E.1.2 I2C und Kamera

Es muss die Kamera und der I2C-Kanal aktiviert werden. Dies erfolgt im Terminal mit dem Befehl 'sudo raspi-config'. Danach öffnet sich ein Konfigurationsfenster. Hier muss der Punkt Interface-Optionen ausgewählt werden. In diesem Unterpunkt findet man die Menüs zu I2C und Kamera. Diese jeweils aktivieren und bestätigen. Die Pi muss nun neu gestartet werden.

E.1.3 VNC-Server

Danach sollte ein VNC-Server installiert werden um Zugriff auf die Pi zu erhalten. Eine gute Anleitung findet sich wieder auf der offiziellen Website der Pi Foundation: https://www.raspberrypi.org/documentation/remote-access/vnc/ [3]

E.1.4 WLan-Access-Point

Ein WLan-Access-Point erleichtert den Zugriff auf die Pi. Diese stellt fortan ein WLan zur Verfügung auf das jedes externe Gerät zugreifen kann.
Eine Anleitung hierzu findet sich erneut auf der offiziellen Seite:
https://www.raspberrypi.org/documentation/configuration/wireless/access-point.md[4]

E.1.5 Update and Upgrade

Vor und nach jeder Installation sollte im Terminal ein Update erzwungen werden. Dies passiert durch den Befehl ' sudo apt-get update' und ' sudo apt-get upgrade'. Ebenso sollte zu Beginn ein großes Update erfolgen durch den Befehl ' sudo apt-get dist-upgrade'. Nach diesen Befehlen empfiehlt sich weiterhin das Kommando ' sudo apt-get autoremove' und 'sudo apt-get autoclean' um veraltete Pakete zu entfernen.

E.2 Python Bibliotheken

Für die Funktionsfähigkeit des Frameworks werden Python Bibliotheken benötigt, welche nicht in der Standartinstallation enthalten sind. Diese werden im Terminal durch den Befehl 'sudo pip install (BIBLIOTHEKNAME HERE)' installiert.
Folgende Pakete werden benötigt:

- PIL
- CV
- numpy
- Tkinter

[3] Abgerufen am 01.07.2019 um 14:00 Uhr
[4] Abgerufen am 01.07.2019 um 14:00 Uhr

- smbus
- Adafruit_ADS1x15

Je nach verwendeter Python Version (2 oder 3) können die Installationsnamen variieren. So heißt PIL für Python2 Pillow und CV ist zu finden unter open-cv oder opencv-python. Sollte die Installation der Pakete scheitern, so empfiehlt es sich hier nachzusehen, wie die Namen für die Installation aufgelöst werden müssen.

E.3 PyBot-Framework

Das Herzstück der Software ist das Python-Framework. Dieses lässt sich über GitHub auf die eigene Pi clonen. Die Daten findet man unter https://github.com/Nitzsch/PyBot [5]
Nachdem das Framework heruntergeladen wurde, sollte die Pin-Belegung im Unterordner Drivers an den eigenen Roboter angepasst werden. Danach lässt sich über die Ausführung des Scripts View der Roboter im Nutzer-Interface starten und steuern. Beim Ausprobieren wünscht der Autor viel Spaß und Erfolg.

[5] Abgerufen am 02.07.2019 um 15:00 Uhr

Literaturverzeichnis

[Gor65] Gordon.E.Moore. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8):114–117, apr 1965.

[Hof11] Marius Hofmeister. *Self-Localization, Mapping and Coverage with Resource-Limited Mobile Robots*. Logos Verlag Berlin GmbH, Berlin, 2011.

[McK91] Phillip John McKerrow. *Introduction to Robotics*. Addison-Wesley Publishers Ltd., Sydney, 1991.

[Nor12] Stuart Russell; Peter Norvig. *Kuenstliche Intelligenz*. Pearson Deutschland GmbH, Hallbergmoos, 2012.

[Nü12] Joachim Hertzberg; Kai Lingemann; Andreas Nüchter. *Mobile Roboter*. Srpinger Vieweg Verlag, Berlin, 2012.

[Sch12] Ekbert Hering; Gert Schönfelder. *Sensoren in Wissenschaft und Technik*. Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.

[Wir99] Gerhard Merzinger; Thomas Wirth. *Repetitorium der Höheren Mathematik*. Binom Verlag, Springe, 1999.