

# **Integration eines Unitree Go1 Quadraped Roboters in ein Hochschul-Ökosystem**

## **M a s t e r a r b e i t**

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hof  
Fakultät Informatik  
Studiengang Master Informatik**

**Vorgelegt bei  
Prof. Dr. Christian Groth  
Alfons-Goppel-Platz 1  
95028 Hof**

**Vorgelegt von  
Noah Lehmann**

**Hof, 8. August 2023**

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                               | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen</b>                               | <b>4</b>  |
| 2.1      | Robotik . . . . .                               | 4         |
| 2.1.1    | Industrieroboter . . . . .                      | 5         |
| 2.1.2    | Serviceroboter . . . . .                        | 5         |
| 2.1.3    | Cobots . . . . .                                | 6         |
| 2.2      | Stand der Forschung . . . . .                   | 7         |
| 2.2.1    | Quadruped Roboter . . . . .                     | 7         |
| 2.2.2    | Integration von Robotern . . . . .              | 9         |
| 2.2.3    | Unitree Go1 Ressourcen . . . . .                | 9         |
| 2.3      | Herausforderungen . . . . .                     | 9         |
| <b>3</b> | <b>Roboterarchitektur und Systemkomponenten</b> | <b>10</b> |
| 3.1      | Aufbau . . . . .                                | 10        |
| 3.1.1    | Überblick . . . . .                             | 10        |
| 3.1.2    | Mechanische Komponenten . . . . .               | 12        |
| 3.1.3    | Hardware und Sensorik . . . . .                 | 13        |
| 3.2      | Inbetriebnahme . . . . .                        | 14        |
| 3.3      | Hardware Architektur . . . . .                  | 14        |
| 3.3.1    | Überblick . . . . .                             | 14        |
| 3.3.2    | Kernelemente . . . . .                          | 14        |
| 3.3.3    | Netzwerk . . . . .                              | 14        |
| 3.3.4    | Überblick . . . . .                             | 15        |
| 3.3.5    | Spezialisierte Hardware . . . . .               | 17        |
| 3.4      | Limitierungen . . . . .                         | 17        |
| 3.4.1    | Rechenleistung . . . . .                        | 17        |
| 3.4.2    | Physische Limitierungen . . . . .               | 17        |
| <b>4</b> | <b>Analyse des Roboters</b>                     | <b>18</b> |
| 4.1      | Vorgehensweise . . . . .                        | 18        |
| 4.2      | Funktionen . . . . .                            | 18        |
| 4.2.1    | Fernsteuerung . . . . .                         | 18        |
| 4.2.2    | Lokales Netzwerk . . . . .                      | 18        |
| 4.2.3    | Monitoring . . . . .                            | 18        |
| 4.2.4    | Audio Interfaces . . . . .                      | 18        |
| 4.2.5    | Video Streaming . . . . .                       | 18        |
| 4.2.6    | Sensorik . . . . .                              | 18        |
| 4.2.7    | Batterie Management . . . . .                   | 18        |
| <b>5</b> | <b>Funktionserweiterungen und Integration</b>   | <b>19</b> |
| 5.1      | Vorbereitungen . . . . .                        | 19        |
| 5.1.1    | Externer Server . . . . .                       | 19        |
| 5.1.2    | Protokolle . . . . .                            | 19        |

---

|          |                                      |           |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 5.2      | Resilienz . . . . .                  | 19        |
| 5.2.1    | BMS . . . . .                        | 19        |
| 5.3      | Konnektivität . . . . .              | 19        |
| 5.3.1    | Wifi . . . . .                       | 19        |
| 5.3.2    | GSM . . . . .                        | 19        |
| 5.3.3    | Bluetooth . . . . .                  | 19        |
| 5.3.4    | Resilienz . . . . .                  | 19        |
| 5.4      | Funktionsauslagerung . . . . .       | 19        |
| 5.4.1    | Auslagerung Rechenleistung . . . . . | 19        |
| 5.4.2    | Fernsteuerung . . . . .              | 19        |
| 5.4.3    | Synchronisation . . . . .            | 19        |
| 5.4.4    | RTSP Server . . . . .                | 19        |
| <b>6</b> | <b>Fazit</b>                         | <b>20</b> |
| 6.1      | Rückblick . . . . .                  | 20        |
| 6.2      | Einschätzung . . . . .               | 20        |
| 6.3      | Potential . . . . .                  | 20        |
| 6.4      | Nächste Schritte . . . . .           | 20        |
| 6.4.1    | Software Upgrades . . . . .          | 20        |
| <b>A</b> | <b>Listings</b>                      | <b>22</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | Vergleich zwischen Industrie- und Servicerobotern . . . . . | 5  |
| 2 | Überblick über den Go1 . . . . .                            | 10 |
| 3 | Mechanische Komponenten des Go1 . . . . .                   | 12 |
| 4 | Sensorik und Daten des Laufapparats . . . . .               | 14 |
| 5 | Darstellung der verbauten Kamera und Sensorik . . . . .     | 15 |
| 6 | Vogelperspektive mit Hardware . . . . .                     | 16 |
| 7 | Überblick über Netzwerkkonfiguration . . . . .              | 17 |

## Abkürzungsverzeichnis

|         |  |   |
|---------|--|---|
| DARPA   | Defense Advanced Research Projects Agency    | 7, 8  |
| Go1     | Unitree Robotics Go1 Edu                     | 2, 3, 4,<br>5, 6, 7,<br>8, 10, 11,<br>12, 13,<br>14, 15 |
| HAW Hof | Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hof | 1, 2, 3   |
| IP      | Internetprotocoll                            | 16, 17  |
| KI      | Künstliche Intelligenz                       | 1, 2, 3   |
| MCU     | Main Control Unit                            | 13, 15,<br>16   |
| MIT     | Massachusetts Institute of Technology        | 8   |
| ML      | Machine Learning                             | 18  |
| NM      | Newton/Meter                                 | 13  |
| RAM     | Random Access Memory                         | 15  |
| RCTA    | Robotics Collaborative Technology Alliance   | 8   |
| ROI     | Return on Investment                         | 6, 7  |
| US      | United States                                | 8   |
| USA     | Vereinigte Staaten von Amerika               | 7   |
| VDI     | Verband Deutscher Ingenieure                 | 4   |
| WWAN    | Wireless Wide Area Network                   | 14, 17  |

## Listings

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | buffer-overflow.c: C Programm Buffer Overflow . . . . . | 22 |
|---|---|----|

## Tabellenverzeichnis

# 1 Einleitung

In der jüngeren Vergangenheit haben Roboter und Automationen im industriellen und privaten Gebrauch immer stärker an Relevanz gewonnen. So soll laut Statista die Anzahl der weltweit verwendeten Roboter 2027 im Vergleich zu diesem Jahr (2023) um fast 20% auf 4.9 Millionen Einheiten steigen. Im Vergleich zu 2016 sind das sogar über 80%.<sup>1</sup> Gründe hierfür sind unter anderen besonders die Entwicklung und Verfügbarkeit immer kostengünstigerer und leistungsfähigerer Sensoren, die jüngere Entwicklungen im Bereich der KI (Künstliche Intelligenz), die Miniaturisierung der benötigten Bauteile und letztlich auch die anbahnende Breitentauglichkeit der Programmierung durch Sprachen wie *Python*.

Formulieru

Nachweise

Der stetige Wachstum der Anzahl der Roboter besonders im industriellen Bereich sowie im Bereich der Haushaltshelfer lenkt die Aufmerksamkeit der Allgemeinheit immer weiter auf das Feld der Robotik. Besonders in Verbindung mit KI gewinnt das Feld weiter an Relevanz. Die Aufmerksamkeit der Allgemeinheit aber auch der Industrie und der Forschung bewirkt, dass zunehmend neue Formen der Roboter entwickelt und erforscht werden. Einige Trends sind beispielsweise:

Belege

- Roboterarten aufzählen
- Quadruped Roboter

Diese Arbeit wird sich mit der Entwicklung und dem Umgang von Quadruped Robotern der Firma *Unitree* beschäftigen.

Durch die weite Verbreitung der Roboter und das erhöhte Interesse der Wirtschaft entstehen vermehrt neue Formen von Robotern. Zu diesen gehören Iterationen der bekannten Formen, wie einarmige Industrieroboter, humanoide Roboter - auch Androide genannt - oder Tierwesen nachempfundene Formen - zoomorphe Roboter, wie beispielsweise sechsbeinige Roboter. Die hohe Entwicklungsrate und der rasante Fortschritt auf diesem Gebiet führt einerseits zu sehr fähigen Geräten, deren Einsatzgebiete aber auf der anderen Seite oftmals nicht oder kaum erforscht sind. Unter anderem durch die Erfolge des Unternehmens *Boston Dynamics* und besonders deren Roboter *Spot* ist die zoomorphe Form des Hundes in der breiten Masse der Anwender bekannt geworden. Die folgende Arbeit setzt sich mit dem Umgang und der Weiterentwicklung solcher vierbeinigen Roboter auseinander.

Im Zuge des Ausbaus der Robotik in der Lehre und Forschung der *HAW Hof (Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hof)* hat die Fakultät Informatik der Hochschule zwei

<sup>1</sup>Sophie Fischer. *Robotics – Market data analysis & forecasts*. Statista Technology Market Outlook. Statista, Aug. 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/116785/dokument/robotics-report/> (besucht am 04. 07. 2023).

Roboter des Modells *Go1 Edu* der Marke *Unitree Robotics* beschafft. Im Vergleich zu einigen Alternativprodukten dieser und anderer Firmen ist der Go1 (Unitree Robotics Go1 Edu) sehr kostengünstig in der Anschaffung und besonders flexibel einsetzbar. Die offenen Schnittstellen des Go1 machen ihn ebenfalls für Forschungsinstitute besonders interessant. Der genaue Funktionsumfang und die potenziellen Einsatzgebiete des Roboters werden im späteren Verlauf der Arbeit genauer erläutert. Das folgende Kapitel grenzt den Umfang der Arbeit genauer ein.

Trotz des Themas *Integration eines Unitree Go1 Quadruped Roboters in ein Hochschul-Ökosystem* beschäftigt sich diese Arbeit weniger mit dem Thema *Robotik* und dem eng gekoppeltem Themenbereich der KI. Stattdessen liegt der Fokus auf der Integration und Funktionserweiterung des Roboters innerhalb eines bestehenden IT-Ökosystems und der Umgebung, in dem dieses eingerichtet ist. Das Umfeld ist in diesem Fall exemplarisch das der HAW Hof. Konkret besteht das Ökosystem der Hochschule aus folgenden Teilbereichen:

- Studierende, Mitarbeiter und Besucher des Campuses
- Flächen und Gebäude
- IT-Infrastruktur inklusive des Rechenzentrums
- Lehr- und Forschungsinhalte

Ziel dieser Arbeit ist es, die Einsatzbereiche des Go1 so zu testen, dass sie dem Ökosystem der HAW Hof möglichst viel Nutzen bereiten.

### **Bewertungskriterien**

Das Ziel soll Schrittweise erreicht werden. Anfangs werden einige Grundlagen erläutert und definiert. So wird genauer auf Begriffe wie *Robotik* und *KI* eingegangen, bevor diese im Laufe der Arbeit weiter vorausgesetzt werden. Zudem wird in diesem Schritt auch eingegrenzt, welche Teilbereiche dieser Fachgebiete relevant für den Verlauf der Arbeit sind.

Im zweiten Schritt wird der in dieser Arbeit referenzierte Go1 genauer betrachtet. Die einzelnen Bauteile werden aufgegliedert und ihre Funktion beschrieben. Abschließend zu diesem Schritt soll noch die Zusammenarbeit der Komponenten erläutert werden. Nachdem der *Ist*-Stand des Roboters erklärt wurde, wird die im Lieferumfang ab Werk enthaltene Funktion gezeigt und dokumentiert. Zur Inbetriebnahme des Go1 benötigt es vorerst kein Wissen über die internen Steuerkomponenten.

Diese werden im nächsten Schritt genauer betrachtet. Die Systemarchitektur und die Funktionen der einzelnen Hardware-Bauteile sollen genau dokumentiert werden. Zudem

Ziel klarer definieren, was macht die Arbeit??

Wie wird Nutzen bewertet?

wird hierbei auch die Kommunikation des Gesamtsystems in sich, als auch mit externen Komponenten wie Fernbedienungen und Endgeräten dokumentiert. Hierzu werden auch die Limitierungen des Roboters im Werkszustand aufgelistet.

Als Nächstes wird darauf eingegangen, welche Schritte am Roboter getätigt werden können, um ihn sinnvoll in das HAW Hof Ökosystem zu integrieren. Die einzelnen Möglichkeiten werden dann genauer aufgeschlüsselt und erläutert sowie bewertet. Des Weiteren sollen dann die finalen Limitierungen des Roboters und mögliche zusätzliche Erweiterungen gezeigt werden. Abschließend wird bewertet, inwiefern die Eingliederung eines Go1 Roboters sinnvoll ist und welches Potenzial dieses Vorgehen birgt.

Diese Arbeit ist im Allgemeinen auf die Integration in ein Ökosystem und die Funktionserweiterung des Go1 in diesem Zug limitiert. Das umfasst, dass Erweiterungen der Funktion im Bereich der Robotik und KI auf der Hardware des Roboters selbst nur inkludiert sind, wenn diese zweckdienlich und zwingend notwendig für eine Erweiterung im Sinne der oben genannten Integration ist. \_\_\_\_\_

In Gliederung noch kommunikation einfügen oder in Protokollen abgedeckt?

Was wird nicht gemacht?

## 2 Grundlagen

Folgendes Kapitel beschreibt die Robotik und die benötigte Einordnung der Arbeit in diese. Hierfür wird die Robotik oberflächlich definiert, eingeteilt und die relevanten Teilbereiche dieser genauer betrachtet. Da diese Arbeit sich mit einem Go1 beschäftigt, wird dieser klassifiziert und in die Bereiche der Forschung, Industrie und weiterer Nutzung eingeordnet. Zum weiteren Verständnis des Ziels der Arbeit - der Analyse und Integration des Go1 in ein bestehendes Ökosystem - wird der aktuelle Stand der Forschung genauer betrachtet. Relevant sind hier besonders die bereits erarbeiteten Erkenntnisse der Nutzung gleicher oder ähnlicher Roboter, als auch die Einbindung anderer Modelle in bestehende Ökosysteme. Hierfür soll nicht nur die Forschung allein betrachtet werden, sondern auch die Arbeit privater Unternehmen und Entwickler. Mit dem Wissen der korrekten Einordnung des Go1 und dem Forschungsstand zu verwandten Themen sollen die Herausforderungen dieser Arbeit hervorgehoben werden, sodass im späteren Verlauf die Erarbeitungen auf die bekannten Probleme verweisen können.

### 2.1 Robotik

Die Robotik befasst sich mit dem Wissensgebiet rund um *Roboter*. Der Begriff *Roboter* stammt vom tschechischen Wort *robota*, was so viel wie *Fronddienst* oder *Zwangsdienst* bedeutet. So treffend diese Übersetzung auf die heutige Nutzung des Wortes ist, so vage ist diese Beschreibung auch. Ähnlich unklar sind auch die anerkannten Definitionen des Wortes *Roboter*. Eine gängige Definition im deutschsprachigen Raum ist die des VDI (Verband Deutscher Ingenieure):

Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d.h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und ggf. sensorgeführt sind<sup>2</sup>.

Auch wenn die VDI-Richtlinie mittlerweile zurückgezogen wurde, wird die Definition aufgrund ihrer treffenden Eingrenzung des Begriffes noch häufig zitiert.

Die umstrittene Definition des Begriffs *Roboter* zieht eine ebenso unklare Einteilung des Wissensfeldes der *Robotik* mit sich. Hält man sich jedoch an die Definition des VDI, so lassen

---

<sup>2</sup>VDI-Gesellschaft Produktionstechnik. *VDI 2860/ Montage- und Handhabungstechnik. Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbol*. Beuthe Verlag, 1990.



sich Roboter in zwei Kategorien einteilen, Industrieroboter und Serviceroboter. Abbildung 1<sup>3</sup> zeigt die beiden Klassifizierungen und deren Eigenschaften im Überblick.

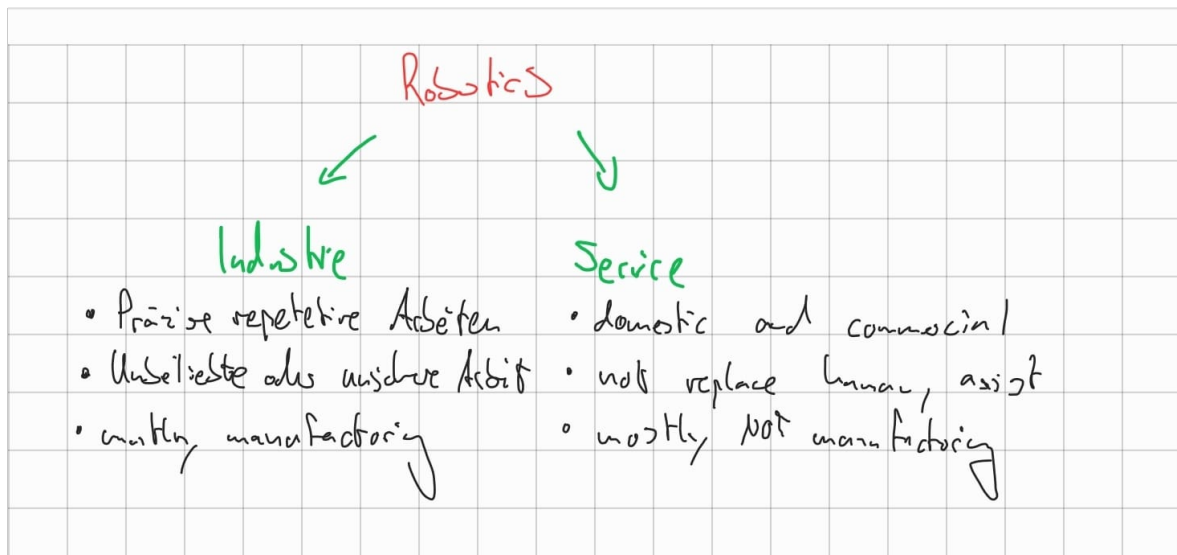


Abbildung 1: Vergleich zwischen Industrie- und Servicerobotern

### 2.1.1 Industrieroboter

Industrieroboter sind Roboter, die im industriellen Umfeld eingesetzt werden den Mensch meist in nicht sicheren, nicht rentablen oder nicht begehrten - repetitiven - Arbeiten ersetzen. Sie sind aufgrund ihrer hohen Spezialisierung an den Einsatzzweck größtenteils stationär. Der Vorteil industriell eingesetzter Roboter ist die hohe Effizienz und Genauigkeit der Arbeiten und die Anpassbarkeit an den Einsatzzweck. Als Nachteil ergibt sich hieraus der hohe Aufwand der Implementierung, da ein hoch spezialisierter Roboter für jeden Einsatzzweck neu geschaffen werden muss. Einsatzzwecke von Industrierobotern sind unter anderen das Schweißen, Lackieren, Montieren und die Materialhandhabung in Produktionsumgebungen.

Die Limitierung des Einsatzes und die strikte Einteilung zu industriellen Einsätzen lässt schlussfolgern, dass der Go1 nicht in die Klasse der Industrieroboter eingegliedert werden kann. Stattdessen kann man ihn in der in dieser Arbeit verwendeten, einfachen Unterteilung den Servicerobotern zuteilen.

### 2.1.2 Serviceroboter

Serviceroboter unterscheiden sich im Kern von Industrierobotern in der Annahme, dass sie Menschen in ihrem Einsatzzweck nicht ersetzen, sondern unterstützen oder von Menschen

<sup>3</sup>Fischer, s. Anm. 1.

unterstützt werden. Der Begriff *Serviceroboter* ist absichtlich weit gefasst und schließt im Umfang dieser Arbeit lediglich industrielle Roboter, so wie sie im vorigen Paragraphen beschrieben werden, aus. Bei Serviceroboter lässt sich grundsätzlich noch zwischen kommerziell eingesetzten und konsumorientierten Robotern unterscheiden<sup>4</sup>.

Serviceroboter sind in der Regel nicht stationär, da sie in ihren Einsatzmöglichkeiten deutlich flexibler sind, als Industrieroboter. Aus dem Vorteil der Flexibilität lässt sich ebenfalls der Nachteil der Komplexität ableiten. Das weitere Einsatzfeld der Serviceroboter steigert in der Regel den Aufwand der Entwicklung, steigert aber ebenfalls den Ertrag des Roboters, finanziell auch den ROI (Return on Investment).

Möchte man die Klasse der Serviceroboter weiter untergliedern, so sind unter anderen folgende Untergliederungen denkbar:

- Spielzeugroboter
- Erkundungsroboter
- Militär-/ Kampfroboter
- Assistenzroboter

Zu Vermerken ist, dass die simple Klassifizierung der Roboter in lediglich zwei Klassen der Industrieroboter und der Serviceroboter gewählt wurde, um die Einsatzzwecke des Go1 in dieser Arbeit nicht einzuschränken. Wie bereits erarbeitet kann man den Go1 vielseitig einsetzen, jedoch ist er nicht geeignet, Menschen in seinen Einsatzgebieten vollständig zu ersetzen, noch ist er strikt auf industrielle Zwecke beschränkt. Eine Zuteilung zu industriellen Robotern ist somit nicht möglich. Eine genauere Klassifizierung innerhalb der Klasse der Serviceroboter ist zwar möglich, jedoch vom finalen Einsatzzweck des Quadruped Roboters abhängig. Mögliche Einsatzzwecke werden später in dieser Arbeit erörtert.

### **2.1.3 Cobots**

Ein weiterer passender Begriff, der der Klassifizierung des Go1 als Serviceroboter nicht widerspricht, ist *Cobot*. *Cobot* setzt sich aus dem Englischen Wort *collaborate* - (zusammenarbeiten, kollaborieren) und dem Wort *Roboter* zusammen. Einige Merkmale sind:<sup>5</sup>

- Kollaborativ und sicher, im Gegensatz zu stationär und abgesichert
- Interaktiv und adaptiv zur Umgebung

---

<sup>4</sup>Fischer, s. Anm. 1.

<sup>5</sup>Fischer, s. Anm. 1.

- Einfache Inbetriebnahme durch vorausschauende Entwicklung
- Flexible Einsatzzwecke
- Schnelleres ROI

Durch seine flexiblen Fortbewegungsmöglichkeiten und der hohen Anzahl an Sensorik und Erweiterungsmöglichkeiten des Go1 sowie der zur Kollaboration einladenden Vorrichtungen wie den Mikrofonen und Lautsprechern<sup>6</sup> lässt sich der Go1 neben der Klassifizierung als Serviceroboter ebenfalls als *Cobot* bezeichnen. Der kollaborative Aspekt und die Unterstützung des Menschen statt der Ersetzung dessen wird im Laufe der Arbeit weiter erörtert.

Herleitung  
Quadru-  
ped

## 2.2 Stand der Forschung

Im Bereich der Quadruped Roboter ist bereits viel erforscht worden. Besonders im Fokus der Arbeiten sind in der Regel die Steuerung der Motoren zur Fortbewegung, die autonome Navigation der Roboter in unbekanntem Umfeld und das Testen der Einsatzmöglichkeiten der vierbeinigen Roboter. Diese Arbeit hingegen beschäftigt sich mit der Integration des Roboters in ein Hochschulökosystem, welche die möglichen Einsatzzwecke nicht vorwegnimmt. Ziel dieser Arbeit ist es, Einsatzmöglichkeiten zu erarbeiten und die nötigen Anpassungen am Modell Go1 vorzunehmen, um diese zu ermöglichen. Deshalb werden im folgenden nur kurz allgemein interessante Forschungen an Quadruped Robotern gezeigt, wonach allgemeine Forschungen zur Einbindung und Nutzung von Servicerobotern dargestellt werden. Zuletzt sollen noch Arbeiten speziell zum Modell Go1 gezeigt werden. Diese werden nicht zwingend akademischen Ursprungs sein und sollen dem Leser der Arbeit einen Überblick über die vorhandenen Ressourcen zum Modell Go1 bieten.

### 2.2.1 Quadruped Roboter

Die erste Umsetzung eines Quadruped Roboters, die öffentliche Aufmerksamkeit erlangte, ist der sogenannte *Big Dog* der Firma *Boston Dynamics* aus Boston, USA (Vereinigte Staaten von Amerika). Dieser wurde 2008 aus militärischem Interesse an einer geländegängigen Alternative zu gängigen Militärfahrzeugen entwickelt und deshalb auch vom amerikanischen DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) finanziert. *Big Dog* wurde mit hydraulischen Extremitäten entwickelt, welche ihm ermöglichen sollten, schweres Gepäck im Militäreinsatz tragen zu können. Die Flexibilität der vier Beine und die Möglichkeit dieser, sich relativ schnell durch schweres Gelände bewegen zu können, gaben *Big Dog*

<sup>6</sup>Siehe Kapitel 3.1.3

einen möglichen Vorteil gegenüber gängigen Fortbewegungsmitteln auf Basis von Ketten oder Rädern. Weitere Entwicklungen am *Big Dog* wurden später vom RCTA (Robotics Collaborative Technology Alliance) des US (United States) Army Research Laboratory finanziert.<sup>7,8</sup>

2009 hat das *Biometric Robotics Lab* des MIT (Massachusetts Institute of Technology) das Projekt namens *Cheetah* - auf Deutsch *Gepard* - bekannt gegeben. Das Projektziel war es, einen Quadruped Roboter zu entwickeln, der in den Bereichen Tempo und Energieeffizienz der echten Tierwelt Konkurrenz macht. Auch dieses Projekt wurde vom DARPA finanziert<sup>9,10</sup>. Im Gegenzug zum *Big Dog* wurde der *Cheetah* aber nie kommerziell oder militärisch beworben. Stattdessen liegt der Fokus des Roboters im Bereich der Forschung. Bereits 2012 veröffentlichte das *Biometric Robotics Lab* die ersten Videos des Roboters im Lauf. Seit der Projektankündigung wurden mehrere Iterationen des Roboters entwickelt. Die aktuelle Iteration des Roboters ist in ihrer Bauart optimiert und somit kostentechnisch effizient im Einkauf und in der Reparatur. Im Gegensatz zum *Big Dog* ist der MIT *Cheetah* voll elektrisch, was das Ziel der einfachen Entwicklung hat.<sup>11</sup> Viele Erkenntnisse aus dem MIT *Cheetah* Projekt werden heute noch in neuen Projekten verwendet. So auch bei der Umsetzung des Go1, worauf in dieser Arbeit aber weniger eingegangen wird.

Die aktuell vermutlich bekannteste Umsetzung eines Quadruped Roboters ist der von *Boston Dynamics* entwickelte *Spot*, welcher in seiner ersten Form bereits 2015 öffentlich beworben wurde. Anders als seine Vorgänger Roboter bei *Boston Dynamics* war er der erste Roboter der Firma, der zu 100% elektrisch betrieben wurde. Das lässt ihn sehr ähnlich zum *Cheetah* des MIT wirken, jedoch hatte die Plattform *Spot* von Anfang an den Fokus auf einen kommerziellen oder auch militärischen Einsatz. Besonders nennenswert an dem Roboter ist die Kompaktheit seinen Vorgängern gegenüber. Die aktuelle Version des *Spot* ist bereits kommerziell verfügbar und wurde initial für etwa 75 000 US-Dollar<sup>12</sup> zum Kauf beworben.<sup>13</sup>

<sup>7</sup>Marc Raibert u. a. *BigDog, the Rough-Terrain Quaduped Robot*. Boston Dynamics, 8. Apr. 2008.

<sup>8</sup>Defense Advanced Research Projects Agency. *Big Dog*. URL: [urhttps://www.darpa.mil/about-us/timeline/big-dog](https://www.darpa.mil/about-us/timeline/big-dog) (besucht am 07.08.2023).

<sup>9</sup>Devan Joseph. „MIT reveals how its military-funded Cheetah robot can now jump over obstacles on its own“. In: *Business Insider* (3. Juni 2015).

<sup>10</sup>Defense Advanced Research Projects Agency. *Maximum Mobility and Manipulation (M3)*. URL: <https://www.darpa.mil/program/maximum-mobility-and-manipulation> (besucht am 07.08.2023).

<sup>11</sup>Jason Falconer. „MIT Cheetah Robot Runs Fast, and Efficiently. It's now the second fastest legged robot in the world“. In: *IEEE Spectrum* (14. Mai 2013).

<sup>12</sup>Evan Ackerman. „Boston Dynamics' Spot Robot Dog Now Available for \$74,500. For the price of a luxury car, you can now get a very smart, very capable, very yellow robotic dog“. In: *IEEE Spectrum* (16. Juni 2020).

<sup>13</sup>Boston Dynamics. *Legacy Robots*. URL: <https://bostondynamics.com/legacy/> (besucht am 08.08.2023).

Die Veranschaulichung *The Rise of the Robot Quadrupeds* gibt einen Überblick über die Zeitschiene der einflussreichsten Implementierungen von Quadruped Robotern in der jüngeren Vergangenheit.

Bilder  
der Ro-  
boter

### **2.2.2 Integration von Robotern**

### **2.2.3 Unitree Go1 Ressourcen**

## **2.3 Herausforderungen**

### 3 Roboterarchitektur und Systemkomponenten

Folgendes Kapitel beschreibt den physischen Aufbau des Go1 und die Konfiguration dessen im Werkzustand. Um die Komplexität des Systems besser verstehen zu können, wird der Aufbau in mehreren Schritten erklärt. Zuerst soll der äußere Aufbau dargestellt werden, danach der Aufbau der internen Systemelemente und der Sensorik und zuletzt soll die Inbetriebnahme und vereinfachte Nutzung des Roboters dokumentiert werden.

#### 3.1 Aufbau

Im Folgenden soll die interne Architektur des Go1 im Detail dargestellt werden. Hierfür werden einige Perspektiven des Roboters gezeigt, um die nach Einsatzzweck klassifizierten Bauteilgruppen zu erläutern und darzustellen.

##### 3.1.1 Überblick

Die zoomorphe Form des Go1 ist - wie bereits mehrfach angedeutet - an die eines Hundes angelehnt. So ergeben sich die Bezeichnungen der äußerlich erkennbaren Bauteile von selbst. Abbildung 2 zeigt die äußerlichen Merkmale im Überblick.

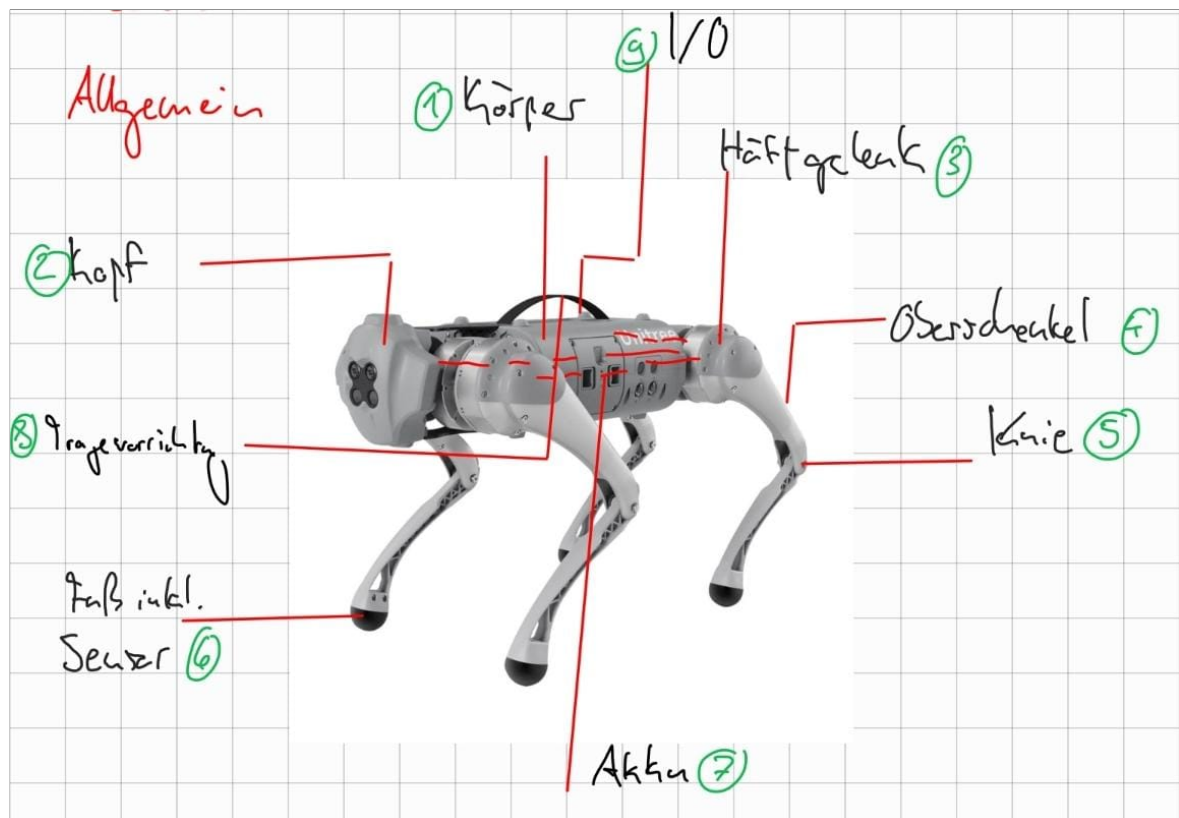


Abbildung 2: Überblick über den Go1

Die Grundlage des Roboters bildet der Körper - auf Abbildung 2 mit ① gekennzeichnet. In diesem sind ie meisten Komponenten des Go1 verbaut, unter Anderen die folgenden:

- Interne Hardwarekomponenten
- Intelligenter Akku
- Teile der Sensorik und Kameras
- Hüftgelenke und Motoren der Beine

Eine genauere Beschreibung der Einzelteile findet sich in den folgenden Unterkapiteln. An der Vorderseite des Körpers ist der Kopf ② des Roboters verbaut. In diesem sind beispielsweise ein *Nvidia Jetson Nano*, eine Stereo-Kamera und Stereo Ultraschall Sensoren und weitere Bauteile wie Lautsprecher und Mikrofone verbaut. An den vier äußeren Ecken des Körpers sind die Beine des Roboters verbaut. Innerhalb des Körpers sind die Motoren zur Steuerung der Hüftgelenke ③ integriert. Außerhalb der Hüftgelenke an der Oberseite der vier Oberschenkel ④ sind vier weitere Motoren zur vertikalen Steuerung der Beine verbaut. Parallel zu diesen Motoren sind im äußeren Teil des oberen Oberschenkels identische Motoren zur Steuerung der Knie ⑤ integriert, die die Gelenke jeweils durch steife Achsen und Seilzüge anwinkeln können. An den Enden der Beine sind jeweils Füße ⑥ verbaut, in denen Drucksensoren integriert sind.

Neben den äußerlich auffälligen Merkmalen ist auf der linken Seite des Körpers noch ein intelligenter Akku ⑦ verbaut. Auf der Oberseite des Körpers sind unterhalb der Tragevorrichtung ⑧ noch Schnittstellen ⑨ zur physischen Verbindung auf die integrierten Hardwarekomponenten verbaut.

### 3.1.2 Mechanische Komponenten

Der Anteil der in Abbildung 3 gezeigten mechanischen Elemente des Go1 hält sich in Grenzen. So sind am Körper selbst lediglich vier bewegliche Teile angebaut - die vier Servomotoren der Hüftgelenke ①. An den Hüftgelenken befestigt sind die einzigen weiteren beweglichen Bauteile des Roboters, die pro Bein jeweils zwei weiteren Motoren für die Neigung der Beine ② und der Kniegelenke ③. Zum Strecken des Kniegelenks wird eine am äußeren Motor

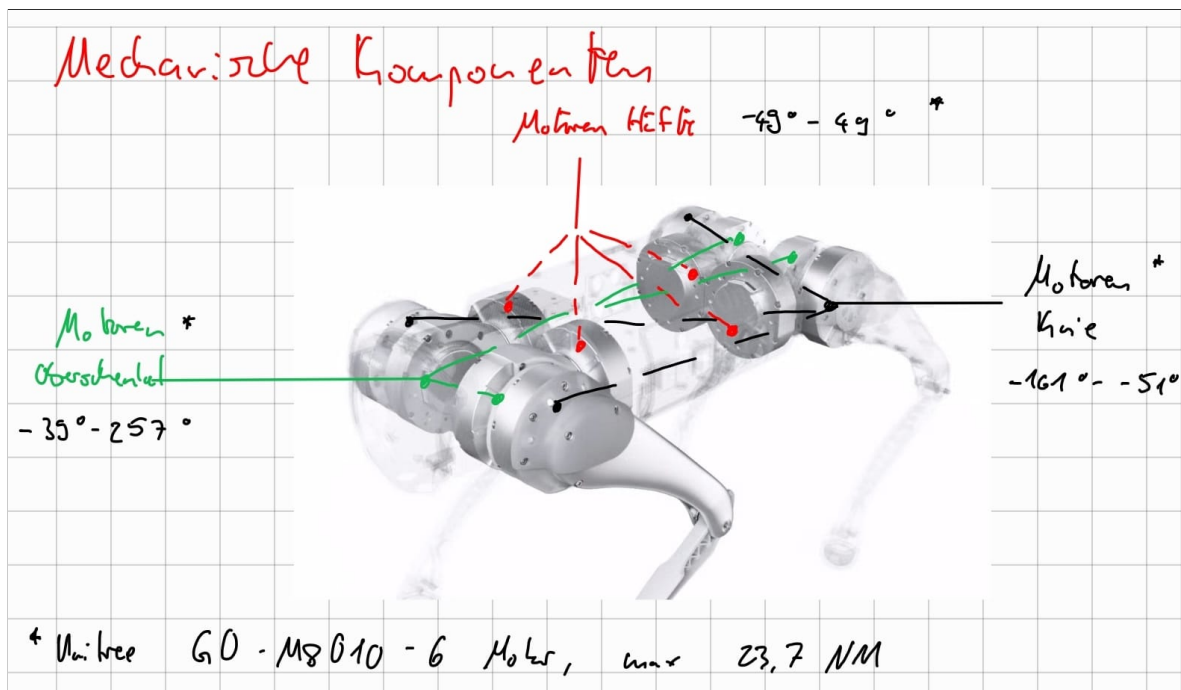


Abbildung 3: Mechanische Komponenten des Go1

angebrachter Seilzug ④ verwendet, zum Anwinkeln des unteren Beines wird im Gegenzug eine starre Verbindung ⑤ an der Vorderseite des Kniegelenks genutzt.

#### Eigenschaften der Servomotoren

Die Servomotoren am Hüftgelenk - Abbildung 3, Bauteil ①, die Motoren an den Beininnenseiten ② und die Motoren an den Beinaußenseiten ③ sind des



gleichen Models - *Unitree Robotics GO-M8010-6 Motor*<sup>14</sup>. Die Servomotoren haben ein maximales Drehmoment von 23.7NM (Newton/Meter) und können in 3 verschiedene Konfigurationen eingeteilt werden:

Sicher  
Servo?

### 1. Hüftmotoren

Bewegungsradius von  $-49^\circ$  bis  $49^\circ$

### 2. Oberschenkelmotoren

Bewegungsradius von  $-39^\circ$  bis  $257^\circ$

### 3. Kniemotoren

Bewegungsradius von  $-161^\circ$  bis  $-51^\circ$

Die Motoren sind ebenfalls mit Sensorik bestückt, welche den aktuellen Zustand des Bauteils erkennen und an die MCU (Main Control Unit) schicken können. Diese Funktionalität wird im Kapitel 3.1.3 näher beschrieben.

#### 3.1.3 Hardware und Sensorik

Als wichtige Bausteine zur intelligenten Nutzung des Go1 sind an vielen Stellen im Roboter einige Sensoren oder intelligente Hardware verbaut. Neben der dedizierten Sensorik zur Erkennung des Umfeldes ist ebenfalls einfachere Sensorik in einigen Bauteilen wie den mechanischen Bauteilen des Laufapparats verbaut. Abbildung 4 zeigt die hierfür verbauten Sensoren und intelligenten Hardwarebausteine.

Ähnlich der mechanischen Eigenschaften der zwölf Servomotoren des Typs *GO-M8010-6* - zwei pro Bein des Roboters ① und je ein Motor im Körper des Roboters ② - sind die sensorischen Funktionen dieser identisch. In Abbildung 7 in Kapitel 3.3.4 ist erkennbar, dass die zwölf Motoren des Go1 über eine RS-485 Schnittstelle mit der MCU verbunden sind. Diese wertet die In-

<sup>14</sup>Unitree Robotics. *GO-M8010-6 Motor* - Unitree Robotics. URL: <https://shop.unitree.com/products/go1-motor> (besucht am 07. 07. 2023).

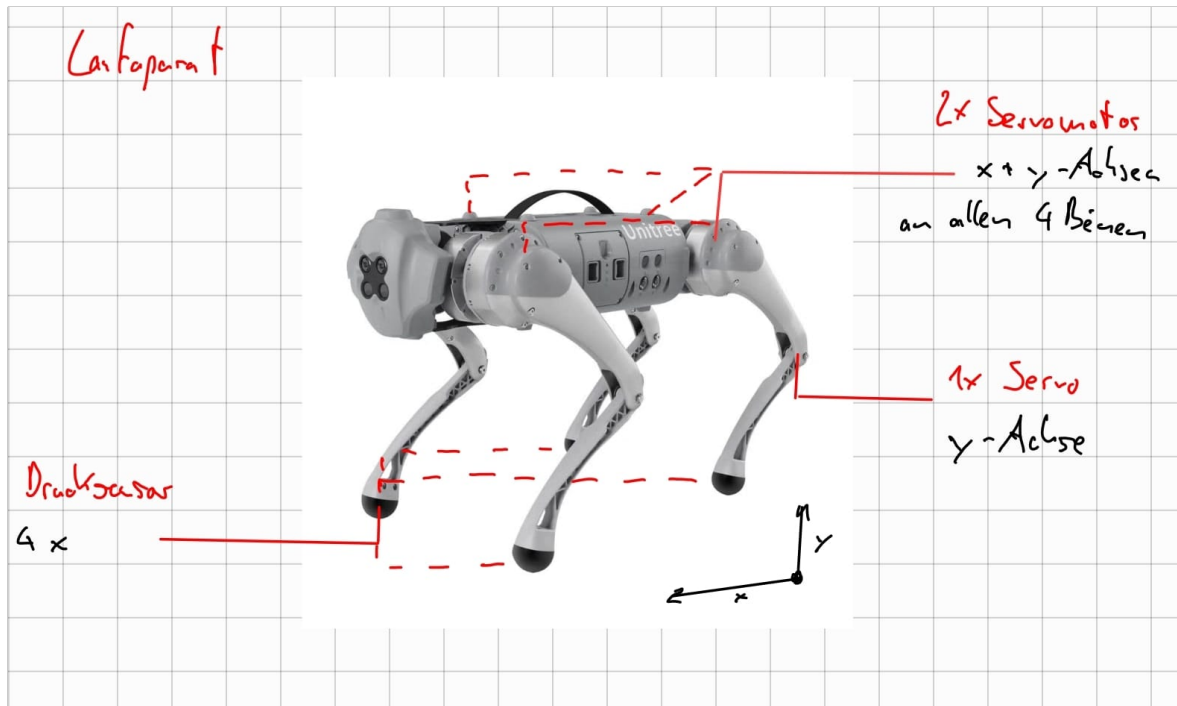


Abbildung 4: Sensorik und Daten des Laufapparats

formationen aus und steuert die einzelnen Motoren über dieselbe Schnittstelle an.

## 3.2 Inbetriebnahme

## 3.3 Hardware Architektur

### 3.3.1 Überblick

### 3.3.2 Kernelemente

### 3.3.3 Netzwerk

Aufgrund der vielen Komponenten, Funktionen und den möglichen Erweiterungen des Go1 ist eine robuste interne Kommunikation nötig. Die interne Kommunikationsstruktur des Roboters baut größtenteils auf Netzwerkstandards wie *Ethernet* und *Wi-Fi* auf, setzt besonders in der Konnektivität mit externen Komponenten jedoch zusätzlich auf weitere Standards wie *Bluetooth* und *WWAN* (*Wireless Wide Area Network*).

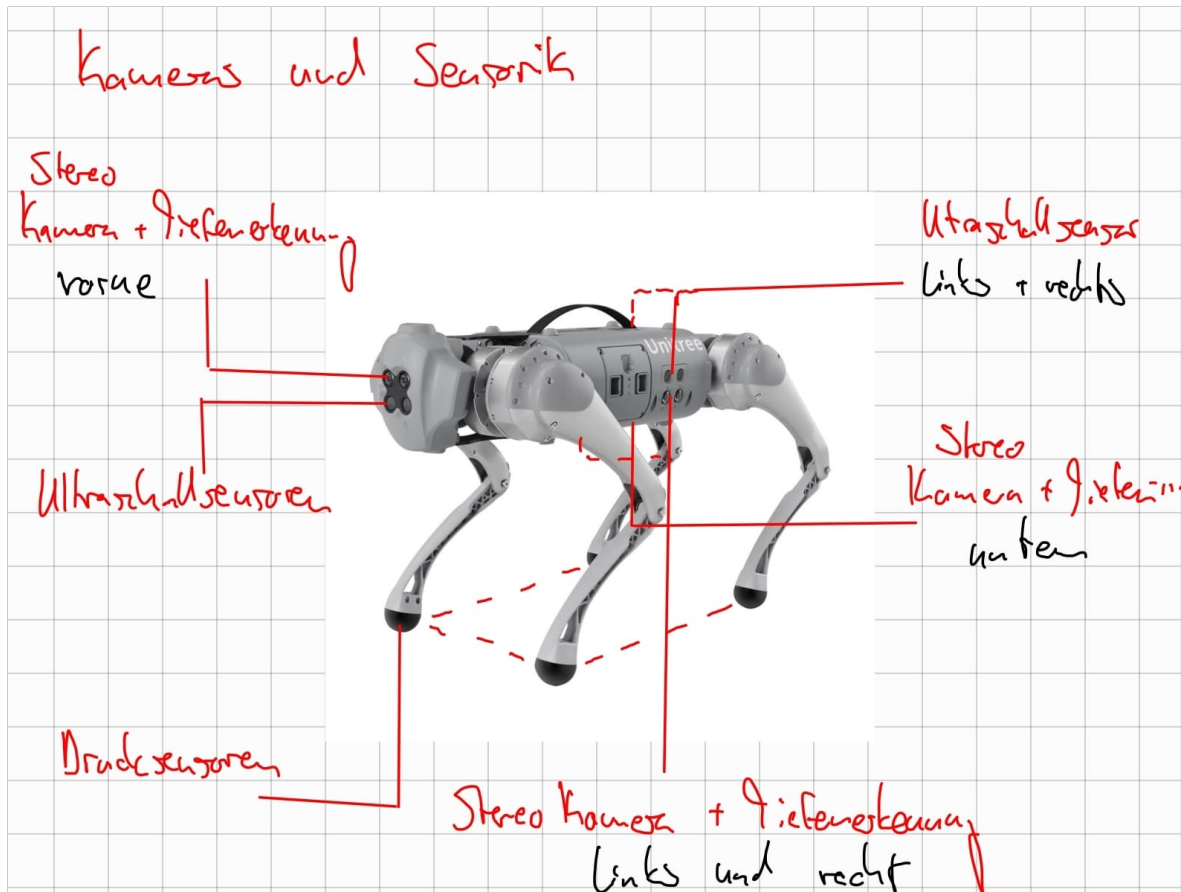


Abbildung 5: Darstellung der verbauten Kamera und Sensorik

Das folgende Kapitel erläutert die vorhandene Kommunikation der internen und externen Komponenten des Go1 und analysiert diese auf ihre Stärken und Schwächen. Zudem soll die Methodik der Analyse des Netzwerks und mögliche Problemfeststellungen und -behebungen festgehalten werden.

### 3.3.4 Überblick

Abbildung 7 gilt als Referenz für die folgenden Ausführungen. Zentrale Einheit der Kommunikation sind der verbaute Ethernet Switch und der intern verbaute Raspberry Pi. Wie auf Abbildung 7 zu erkennen ist, sind alle fünf manipulierbaren Platinen - der Raspberry Pi, die MCU, die beiden Nvidia Jetson Nanos mit 4GB RAM (Random Access Memory) und der Nano im Kopf des Hundes - per *Ethernet* mit dem Switch verbunden. Auch der extern

was für  
switch

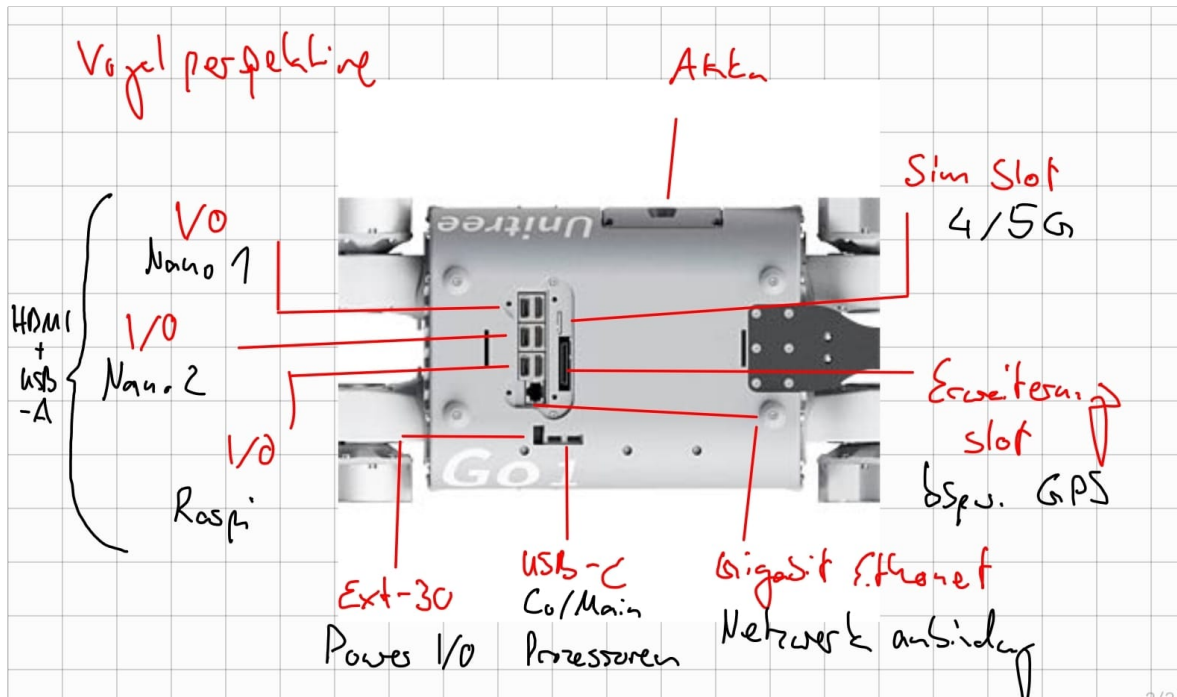


Abbildung 6: Vogelperspektive mit Hardware

zugängliche Ethernet-Port auf dem Rücken des Roboters ist mit dem Switch verbunden.

Alle geschwitchten Komponenten des Netzwerks sind im 192.168.123.0/24-Netzwerk registriert. Dabei ist die Verteilung der IP (Internetprotocoll)-Adressen folgendermaßen vorkonfiguriert:

- **MCU:** 192.168.123.10
- **Raspberry Pi:** 192.168.123.10
- **Nvidia Jetson Nanos:**
  1. Kopf: 192.168.123.13
  2. Seiten: 192.168.123.14
  3. Unterseite: 192.168.123.15

Dem Endgerät, das am externen Ethernet-Port an der Oberseite des Roboters angesteckt werden kann, muss eine statische IP-Adresse im Bereich

Überblick  
Quelle  
aus An-  
leitung

was ist  
gate-  
way?  
nötig?

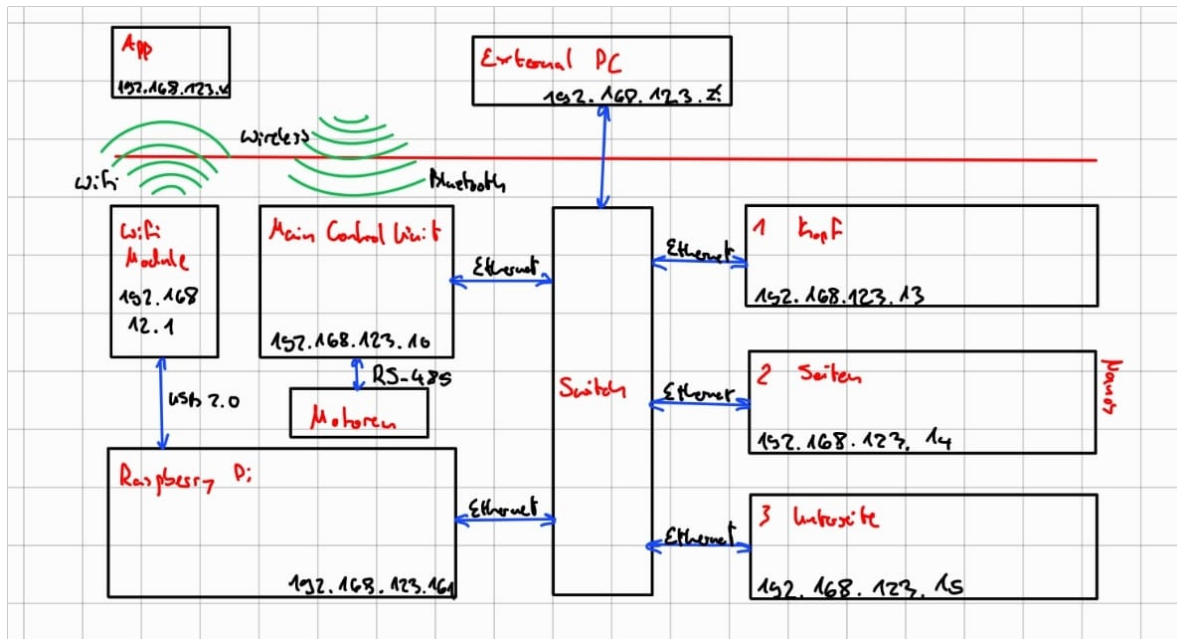


Abbildung 7: Überblick über Netzwerkkonfiguration

192.168.123.0/24 vergeben werden, die nicht bereits von einem der oben genannten Geräten verwendet wird.

Der Raspberry Pi hat zusätzlich zu seiner physischen Verbindung zum Switch und der 192.168.123.161-IP-Adresse noch ein WWAN Modul verbaut, mit welchem er das Netz 192.168.12.0/24 publiziert. Dieses Netz wird ab Werk für die Verbindung der App mit dem System benötigt. Des Weiteren kann dieses Netz genutzt werden, um eine kabellose Verbindung mit dem Gesamtsystem des Roboters herzustellen. Hierzu mehr in Kapitel 3.3.5.

### 3.3.5 Spezialisierte Hardware

#### Raspberry Pi

## 3.4 Limitierungen

### 3.4.1 Rechenleistung

### 3.4.2 Physische Limitierungen

MCU  
und  
Blue-  
tooth?  
Wie?

Welche  
Art  
Netz-  
werk,  
swit-  
ched,  
routed,  
hub?

## 4 Analyse des Roboters

Dieses und die folgenden Kapitel beschäftigen sich lediglich mit der Infrastruktur rund um den Roboter und der Hardware und den Funktionen, die bereits im Roboter verbaut sind oder ergänzt werden können. Die Funktionen rund um ML (Machine Learning), erweiterte Robotik, LIDAR werden nicht behandelt. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Ansatz der Analyse des Roboters. Es wird gezeigt, wie die bestehenden Funktionen getestet und genutzt werden können, wie erkannt wird, welche Funktionen bereits aktiviert sind und welche Teile der Soft- oder Hardware nicht aktiviert sind. Zum Abschluss werden die bereits vorhanden Funktionen in dem Umfang, in dem sie ab Werk geliefert wurden, gezeigt und erklärt. Einige der Funktionen werden im späteren Verlauf der Arbeit auch erweitert oder verändert. Die Dokumentation hierzu ist in Kapitel 5 zu finden. Betroffene Funktionen werden hier im Kapitel explizit hervorgehoben.

abk

### 4.1 Vorgehensweise

### 4.2 Funktionen

#### 4.2.1 Fernsteuerung

#### 4.2.2 Lokales Netzwerk

#### 4.2.3 Monitoring

#### 4.2.4 Audio Interfaces

#### 4.2.5 Video Streaming

#### 4.2.6 Sensorik

#### 4.2.7 Batterie Management

## **5 Funktionserweiterungen und Integration**

### **5.1 Vorbereitungen**

#### **5.1.1 Externer Server**

#### **5.1.2 Protokolle**

### **5.2 Resilienz**

#### **5.2.1 BMS**

### **5.3 Konnektivität**

#### **5.3.1 Wifi**

#### **5.3.2 GSM**

#### **5.3.3 Bluetooth**

#### **5.3.4 Resilienz**

### **5.4 Funktionsauslagerung**

#### **5.4.1 Auslagerung Rechenleistung**

#### **5.4.2 Fernsteuerung**

#### **5.4.3 Synchronisation**

#### **5.4.4 RTSP Server**

## **6 Fazit**

### **6.1 Rückblick**

### **6.2 Einschätzung**

### **6.3 Potential**

### **6.4 Nächste Schritte**

#### **6.4.1 Software Upgrades**





## Anhang A Listings

Listing 1: buffer-overflow.c: C Programm Buffer Overflow

```
#include <stdio.h>

int main(){
    char buff[2];

    for(int i = 0; i < 5; ++i)
        buff[i] = 'a';

    for(size_t i = 0; i < 1000000; ++i)
        printf("%c\n", buff[i]);
}
```

## Literatur

- [1] Evan Ackerman. „Boston Dynamics’ Spot Robot Dog Now Available for \$74,500. For the price of a luxury car, you can now get a very smart, very capable, very yellow robotic dog“. In: *IEEE Spectrum* (16. Juni 2020).
- [2] Defense Advanced Research Projects Agency. *Big Dog*. URL: [urhttps://www.darpa.mil/about-us/timeline/big-dog](https://www.darpa.mil/about-us/timeline/big-dog) (besucht am 07.08.2023).
- [3] Defense Advanced Research Projects Agency. *Maximum Mobility and Manipulation (M3)*. URL: <https://www.darpa.mil/program/maximum-mobility-and-manipulation> (besucht am 07.08.2023).
- [4] Boston Dynamics. *Legacy Robots*. URL: <https://bostondynamics.com/legacy/> (besucht am 08.08.2023).
- [5] Jason Falconer. „MIT Cheetah Robot Runs Fast, and Efficiently. It’s now the second fastest legged robot in the world“. In: *IEEE Spectrum* (14. Mai 2013).
- [6] Sophie Fischer. *Robotics – Market data analysis & forecasts*. Statista Technology Market Outlook. Statista, Aug. 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/116785/dokument/robotics-report/> (besucht am 04.07.2023).
- [7] Devan Joseph. „MIT reveals how its military-funded Cheetah robot can now jump over obstacles on its own“. In: *Business Insider* (3. Juni 2015).
- [8] Jeremy Moses und Geoffrey Ford. *The Rise of the Robot Quadrupeds*. 11. Dez. 2020. URL: <https://mappinglaws.net/rise-robot-quadrupeds.html> (besucht am 07.08.2023).
- [9] VDI-Gesellschaft Produktionstechnik. *VDI 2860/ Montage- und Handhabungstechnik. Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbol*. Beuth Verlag, 1990.
- [10] Marc Raibert u. a. *BigDog, the Rough-Terrain Quaduped Robot*. Boston Dynamics, 8. Apr. 2008.
- [11] Unitree Robotics. *GO-M8010-6 Motor - Unitree Robotics*. URL: <https://shop.unitree.com/products/go1-motor> (besucht am 07.07.2023).