

Integration eines Unitree Go1 Quadruped 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, 10. August 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	4
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	11
2.3	Herausforderungen	14
3	Roboterarchitektur und Systemkomponenten	18
3.1	Aufbau	18
3.1.1	Überblick	18
3.1.2	Mechanische Komponenten	20
3.1.3	Hardware und Sensorik	21
3.2	Inbetriebnahme	22
3.3	Hardware Architektur	22
3.3.1	Überblick	22
3.3.2	Kernelemente	22
3.3.3	Netzwerk	22
3.3.4	Spezialisierte Hardware	25
3.4	Limitierungen	25
3.4.1	Rechenleistung	25
3.4.2	Physische Limitierungen	25
4	Analyse des Roboters	26
4.1	Vorgehensweise	26
4.2	Funktionen	26
4.2.1	Fernsteuerung	26
4.2.2	Lokales Netzwerk	26
4.2.3	Monitoring	26
4.2.4	Audio Interfaces	26
4.2.5	Video Streaming	26
4.2.6	Sensorik	26
4.2.7	Batterie Management	26
5	Funktionserweiterungen und Integration	27
5.1	Vorbereitungen	27
5.1.1	Externer Server	27
5.1.2	Protokolle	27
5.2	Resilienz	27
5.2.1	BMS	27

5.3	Konnektivität	27
5.3.1	Wifi	27
5.3.2	GSM	27
5.3.3	Bluetooth	27
5.3.4	Resilienz	27
5.4	Funktionsauslagerung	27
5.4.1	Auslagerung Rechenleistung	27
5.4.2	Fernsteuerung	27
5.4.3	Synchronisation	27
5.4.4	RTSP Server	27
6	Fazit	28
6.1	Rückblick	28
6.2	Einschätzung	28
6.3	Potential	28
6.4	Nächste Schritte	28
6.4.1	Software Upgrades	28
A	Listings	30

Abbildungsverzeichnis

1	Vergleich zwischen Industrie- und Servicerobotern	5
2	Überblick über den Go1	18
3	Mechanische Komponenten des Go1	20
4	Sensorik und Daten des Laufapparats	22
5	Darstellung der verbauten Kamera und Sensorik	23
6	Vogelperspektive mit Hardware	24
7	Überblick über Netzwerkkonfiguration	25

Abkürzungsverzeichnis

DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency	7, 8
Go1	Unitree Robotics Go1 Edu	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23
HAW Hof	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hof	1, 2, 3
IP	Internetprotocoll	24, 25
KI	Künstliche Intelligenz	1, 2, 3
Lidar	Light Detection and Ranging	10
MCU	Main Control Unit	21, 23, 24
MIT	Massachusetts Institute of Technology	8, 13
ML	Machine Learning	26
NM	Newton/Meter	21
PDF	Portable Document Format	12
RAM	Random Access Memory	23
RCTA	Robotics Collaborative Technology Alliance	8
ROI	Return on Investment	6, 7
ROS	Robot Operation System	12, 15
US	United States	8
USA	Vereinigte Staaten von Amerika	7
VDI	Verband Deutscher Ingenieure	4
WWAN	Wireless Wide Area Network	22, 25

Listings

1	buffer-overflow.c: C Programm Buffer Overflow	30
---	---	----

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%.¹ 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

¹Sophie 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
defi-
nieren,
was
macht
die ar-
beit??

Wie
wird
Nutzen
bewer-
tet?

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 sind².

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

²VDI-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 1³ zeigt die beiden Klassifizierungen und deren Eigenschaften im Überblick.

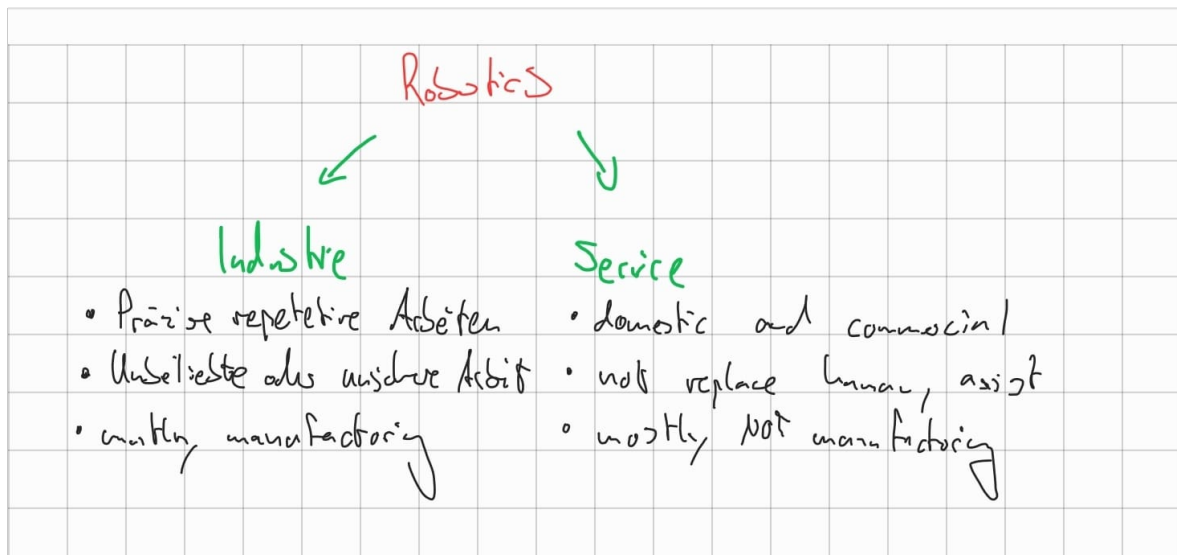


Abbildung 1: Vergleich zwischen Industrie- und Servicerobotern

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

³Fischer, 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 unterscheiden⁴.

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:⁵

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

⁴Fischer, s. Anm. 1.

⁵Fischer, 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 Lautsprechern⁶ 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*

⁶Siehe 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.^{7,8}

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^{9,10}. 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.¹¹ 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-Dollar¹² zum Kauf beworben.¹³

Akademisch
for-
schung
als
fokus

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

⁸Defense 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).

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

¹⁰Defense Advanced Research Projects Agency. *Maximum Mobility and Manipulation (M3)*. URL: <https://www.darpa.mil/program/maximum-mobility-and-manipulation> (besucht am 07. 08. 2023).

¹¹Jason 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).

¹²Evan 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).

¹³Boston 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 Vergangenheit¹⁴.

Bilder
der Ro-
boter

2.2.2 Integration von Robotern

Im Bereich der Robotik liegt neben dem Fokus des Testens der Möglichkeiten immer die Suche nach einer sinnvollen Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse und der entwickelten Roboter in realen Szenarien. Hierbei sind die Möglichkeiten kaum limitiert und hängen stets von der Form und Reife der Roboterimplementierungen ab. Im Folgenden werden einige aktuelle Ansätze zur Integration und Nutzung von Quadruped Robotern in realen Szenarien vorgestellt.

Die unten genannten Einsatzmöglichkeiten von Quadruped Robotern sind lediglich eine Auswahl des offensichtlichen Potenzials und sollen lediglich einen Überblick schaffen. Eine vollständige Auflistung der Integrationsansätze ist hier nicht angestrebt.

Kontrolle und Überwachung

Quadruped Roboter sind aufgrund ihrer Fähigkeit, sich in unstrukturierten Umgebungen fortzubewegen, gut dafür geeignet, in gefährlicheren Gebieten die Kontrollfunktion des Menschen zu übernehmen. Zudem kann ein weit genug entwickelter Roboter autonom Aufgaben übernehmen und diese in regelmäßigen Intervallen durchführen, was einen großen Vorteil dem Menschen gegenüber darstellt. Eine mögliche Einsatzmöglichkeit von Quadruped Robotern ist laut des Artikels „Real-Time and Remote Construction Progress Monitoring with a Quadruped Robot Using Augmented Reality“ das Überwachen und Prüfen des Fortschritts auf Baustellen. Die Autoren bezeichnen die manuelle Kontrolle einer Baustelle durch einen menschlichen Inspektor als zeitlich ineffizient, unstrukturiert und unzuverlässig. Sie bemängeln zudem, dass die menschlichen Kontrollen aufgrund kleinster Abweichungen in der Systematik kaum wiederholbar sind und somit schlecht einzuordnen sind. Ihr Ansatz, die zu kontrollierenden Umgebung zu virtualisieren und dann anhand automatisierter Abläufe und Scans durch Quadruped Roboter mit den zu erzielenden Ergebnissen abzugleichen birgt zwar einige Hürden, verspricht jedoch ein konsistentes Ergebnis über den zeitlichen Verlauf der Baustelle hinweg. Zudem heben die Autoren die zeitliche Ersparnis und somit die Effizienz des Ansatzes hervor, da selbst bei einer nur teilweise automatisierten Umsetzung ein verteiltes

¹⁴Jeremy 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).

Monitoring möglich ist, bei dem sich nur der Roboter mit Sensorik und Kameras vor Ort befinden muss.¹⁵

Im Bereich der Integration eines solchen Quadruped Roboters im Hochschulumfeld lässt sich dieser Ansatz beispielsweise in der automatisierten Modellierung des Campus übersetzen. Ein vorheriges Erstellen eines exakten Modells ist bei diesem Ansatz nicht nötig, man macht sich hier lediglich die Möglichkeit der Modellierung durch Sensorik wie beispielsweise Ultraschall, Lidar (Light Detection and Ranging) und Kameras zu nutzen.

Sicherheit

Da die Umgebung in urbanen Umgebungen zu großen Teilen unstrukturiert ist, ist der Einsatz dedizierter Roboter für den Betrieb auf Straßen oder in der Luft oft erheblich eingeschränkt. Neben der flexibleren Manövrierbarkeit von Quadruped Robotern ist die Erweiterbarkeit dieser ein weiterer Vorteil gegenüber einfacheren Robotern auf Basis von Rädern oder Dronen. So ermöglicht die Erweiterung eines serienmäßigen *Spot* Roboters durch einen Arm mit Greifer laut der Studie „Robotics’ Role in Public Safety“ die Gefahrenminimierung für Menschen in Einsatzzwecken wie der Kontrolle verdächtiger Objekte und dem möglichen Entfernen dieser aus einer Gefahrenzone, dem Aufspüren potenziell gefährlicher Substanzen in der Umgebung (Strahlung, Leckagen, Flüssigkeiten) oder der vorzeitigen Prüfung einer Umgebung, um den Einsatzkräften in Notfallsituationen einen besseren Überblick zu verschaffen, ohne sich selbst in Gefahr zu bringen. *Boston Dynamics* heben in ihrer Studie besonders die hohe Modularität von Quadruped Robotern hervor, welche sie flexibel einsetzbar macht.¹⁶

Im Umfang dieser Arbeit wäre im Sinne der Sicherheit eine Nutzung des Roboters bei Brandbildung zur Suche nach Verletzten denkbar. Auch ein Ablaufen der potenziell gefährlichen Labore und der Prüfung nach Leckagen ist denkbar. Zu Schließzeiten könnten Quadruped Roboter wie der *Go1* ebenso genutzt werden, um den Campus nach nicht autorisierten Besuchern abzusuchen.

Automatisierung und Effizienz

Wie in Kapitel 2.1 erläutert, bringt die Herkunft des Wortes *Roboter* eine der Kernziele der Robotik zum Vorschein. Die Automatisierung und Entlastung des Menschen bei einfachen oder wenig begehrenswerten Aufgaben liegt hier im Fokus. So können Roboter einfache und repetitive Aufgaben übernehmen und teilweise mit höherer Präzision und Ausdauer

¹⁵Srijeet Halder u. a. „Real-Time and Remote Construction Progress Monitoring with a Quadruped Robot Using Augmented Reality“. In: *Buildings* (Dez. 2022). URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12112027>.

¹⁶Boston Dynamics. „Robotics’ Role in Public Safety. How robots like Boston Dynamics’ Spot are keeping people safe.“ In: (2023).

übernehmen, als der ersetzte Mensch dies hätte tun können. übersetzt man diese Erkenntnis auf Quadruped Roboter, so ergeben sich in unstrukturierten Umgebungen, wie besonders der Landwirtschaft, neue Automatisierungsmöglichkeiten. Die Arbeit *Towards Computer-Vision Based Vineyard Navigation for Quadruped Robots* beschreibt beispielsweise die Nutzung eines Quadruped Roboters, um im unebenen Umfeld von Weingärten Weinreben automatisch zu kontrollieren und mithilfe einer Erweiterung auch zu kürzen, sodass die Pflanze keine unnötigen Ressourcen verschwendet. Gleiches lässt sich auch auf andere Gebiete der Landwirtschaft übersetzen. So könnten Quadruped Roboter Kontrollgänge von Jägern und Förstern teilweise ersetzen oder die Frequenz dieser erhöhen.

Auch hier lässt sich die Brücke zur Integration in ein Hochschulökosystem schlagen. Ein automatisierter Roboter könnte auf mehreren Ebenen eines Hochschulgebäudes beispielsweise die Schließzeiten kontrollieren und durchsetzen. Ein Ablaufen und Kontrollieren der Schlösser und gegebenenfalls ein Abschließen dieser ist mit wenig Erweiterungsaufwand möglich.

Service

Auch im Bereich der allgemeinen Unterstützung des Menschen ist der Quadruped Roboter besonders in unstrukturierten Umgebungen hilfreich. Der bereits in Kapitel 2.2.1 beschriebene *Big Dog* wurde beispielsweise entwickelt, um in Kriegsgebieten und Kampfeinsätzen schweres Gepäck befördern zu können. Dies entlastet den menschlichen Soldaten ungemein und ermöglicht ihm, andere Aufgaben zu übernehmen.¹⁷ Dieser Ansatz des Lastentragens ist auch im außermilitärischen Bereich denkbar. Ein weiterer Ansatz ist der der Navigationshilfe. Durch die flexible Fortbewegung über unebene Untergründe kann ein solcher Quadruped Roboter einem Menschen bei der Navigation zu einem Ziel helfen.

Dieses Szenario ist auch im Hochschulumfeld denkbar. So könnte der Roboter neue Gäste empfangen und auf Anfrage über den Campus hinweg Navigationshinweise zu gesuchten Orten liefern und die Gäste auch begleiten.

2.2.3 Unitree Go1 Ressourcen

Im Folgenden werden einige für die Arbeit am Go1 hilfreiche Ressourcen aufgelistet und bewertet. Diese sind ausschließlich nicht nur akademischer Art und müssen dementsprechend mit besonderer Vorsicht betrachtet werden. Dennoch sind diese Ressourcen besonders hilfreich und können eine gute Grundlage und Ergänzung zu den Ergebnissen im Verlauf der Arbeit bieten.

¹⁷Raibert u. a., s. Anm. 7.

Offizielle Dokumentation

Die Webseite <https://www.docs.quadruped.de/projects/go1/html/index.html>¹⁸ bietet einen grundlegenden Überblick über den Aufbau des Go1 und die Funktionen, die im Lieferumfang des Roboters mit enthalten sind. Sie enthält alle nötigen Informationen, die die Entwickler des Roboters gesammelt und veröffentlicht haben. Die Seite bietet einen guten Einstieg, um die Anweisungen direkt am Roboter anzuwenden, ohne sie weiter nachvollziehen zu können.

Auf der Unterseite `/operation.html` sind auch alle offiziellen Anleitungen dokumentiert, welche als PDF (Portable Document Format) heruntergeladen werden können. Des weiteren enthält die Webseite einige einfache Konfigurationsanleitungen für die Software-Erweiterungen, welche ab Werk installiert und freigeschaltet sind.

Neben der allgemeinen Dokumentation des Roboters sind auch einige *GitHub*-Repositories und Dokumentationen zu einzelnen Funktionen des Go1 bereitgestellt. Die wichtigsten sind:

- **Unitree-Legged-SDK**

https://github.com/unitreerobotics/unitree_legged_sdk

→ Eine Bibliothek, um die Steuerung des Roboters zu beeinflussen

- **Unitree-Camera-SDK**

<https://github.com/unitreerobotics/UnitreecameraSDK>

→ Eine Bibliothek, um die Kameras des Roboters zu nutzen

- **Unitree-Actuator-SDK**

https://github.com/unitreerobotics/unitree_actuator_sdk

→ Eine Bibliothek, die die verbauten Motoren einzeln steuert

- **Unitree-ROS2-to-Real**

https://github.com/unitreerobotics/unitree_ros2_to_real

→ Eine Bibliothek, welche das veraltete ROS (Robot Operation System) (1) auf den Robotern ersetzen kann

Anzumerken ist, dass die offizielle Dokumentation auf der Webseite und den GitHub-Repositories zwar einen guten Einstieg in die direkte Nutzung des Roboters liefern, jedoch meist unverständlich geschrieben, unvollständig und teils nicht übersetzt, sondern in der Originalsprache *Chinesisch* veröffentlicht wurden. Deshalb wird in dieser Arbeit dazu geraten, die später gelisteten alternativen Wissensquellen ebenfalls zu nutzen, wenn auch mit kritischem Blick, da vieles nicht offiziell bestätigt oder geprüft wurde.

¹⁸Unitree Robotics. *GO1 Manuals - GO1 Tutorials 1.0.0 documentation*. URL: <https://www.docs.quadruped.de/projects/go1/html/index.html> (besucht am 08.08.2023).

MIT Cheetah Dokumentation

Der mechanische Aufbau und die allgemeine Erscheinung des Go1 sind der des MIT *Cheetah 3* ähnlich und in Teilen sogar identisch. Es ist also anzunehmen, dass *Unitree Robotics* Teile der Ergebnisse der Forschung am MIT *Cheetah 3* für die Entwicklung des Go1 wiederverwertet haben. Wenn auch kurz nach Veröffentlichung unklar, wird die Lizenz der MIT-Software, die im Go1 verwendet wird, mittlerweile anerkannt und referenziert. Aus diesem Grund ist es ratsam, die hervorragend dokumentierten Erkenntnisse über den MIT *Cheetah 3* zur Hand zu nehmen, wenn man genaueres über den Aufbau und die Funktion des Go1 wissen will. Ein Einstieg gewährt hier der Artikel „MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot“, welcher parallel zur Veröffentlichung des *Cheetah 3* erschien.

Bilder
als Ver-
gleich

Seit der Veröffentlichung des *Cheetah 3* sind seitens des MIT weitere Forschungsartikel über diesen veröffentlicht wurden. Hier hilft ein Blick auf die Webseite des Instituts *MIT Biometric Robotics Lab* - <https://biomimetics.mit.edu/publications>, an welchem der *Cheetah 3* und seine Vorgänger entwickelt wurden. Für einen technischeren Überblick über die Hard- und Software-Steuerungen des MIT *Cheetah 3* und somit auch des Go1 ist das *GitHub*-Repository des Biometrics Robotic Lab hilfreich¹⁹.

Im Gegensatz zur offiziellen Dokumentation der Firma *Unitree Robotics* sind die Erkenntnisse aus der MIT Dokumentation fundiert und nachvollziehbar. Leider beziehen sich die Überschneidungen der beiden Roboter nur auf allgemeine Konzept und Teile der konkreten Umsetzung des Go1, die genaue Funktionalität ist bei beiden Robotern sehr unterschiedlich.

Innoffizielle Repositories

Durch die niedrige finanzielle Hürde beim Erwerb eines Go1 hat sich nach Veröffentlichung des Roboters schnell eine vergleichsweise große und aktive Community gebildet, welche sich in der Arbeit mit dem Go1 unterstützt und untereinander austauscht. Innerhalb der Community haben sich einige wenige Teilhaber durch das Anlegen gut dokumentierter Repositories mit Anwendungsbeispielen und Implementierungen neuer Funktionen hervorgetan. Da die realen Namen dieser Nutzer aus den Foren und Repositories nicht hervorgehen, werden ihre Referenzen hier gewürdigt und eingeordnet.

- <https://github.com/MAVProxyUser/YushuTechUnitreeGo1>

Ein sehr detailreiches Repository, welches eine Nutzer-fokussierte Herangehensweise

¹⁹<https://github.com/mit-biomimetics/Cheetah-Software>

an die Dokumentation des Roboters pflegt. Der Autor beschreibt den Aufbau nicht nur in einfachen Worten, sondern gibt auch einfache Anweisungen zu Konfiguration und Nutzung einzelner Funktionen. Besonders zum Einstieg eine gute Anleitung, um der erweiterten Nutzung näherzukommen.

- <https://github.com/maggusscheppi/Go1>

Ein weniger detailliertes Repository, welches jedoch gute Ansätze zur Lösung für gängige Probleme aufweist und zudem pragmatische Implementierungen neuer Funktionen enthält. Empfehlenswert im Bereich Batteriemanagement und Monitoring²⁰.

Inoffizielle Foren

Wie bereits erwähnt, ist die Nutzerbasis und die Community um das Thema Go1 nach Veröffentlichung und Verkaufsstart des Roboters stark gewachsen. Neue Nutzer des Go1 sollten sich demnach nicht scheuen, nach Foren und ähnlichen Ressourcen zu suchen, um sich bei Problemen an erfahrenere Besitzer des Roboters zu wenden. Das wohl präsenteste und auch aktivste Forum ist der *Slack-Kanal The Dog Pound animal control for Stray robot dogs*²¹. Der Beitritt neuer Nutzer ist erwünscht, die aktive Beteiligung ebenfalls. Der Link in der Fußnote kann genutzt werden, um dem Kanal beizutreten, eine Nutzung der Ressource ohne Beitritt ist leider nicht möglich.

2.3 Herausforderungen

Abschließend zu den Grundlagen über die Robotik und dem Stand der Forschung zum Thema Integration, Quadruped Robotik und dem Go1 sollen einige Herausforderungen geschildert werden, die bei der Arbeit mit dem Roboter zu beachten sind und die im Laufe der Arbeit teilweise gemeistert werden sollen.

Dokumentation

Wie aus dem vorigen Kapitel 2.2.3 entnommen werden kann, ist die offizielle Dokumentation der Firma *Unitree Robotics* unzureichend, weshalb auch ein Blick auf verwandte und inoffizielle Ressourcen zu empfehlen ist. Nicht nur die allgemeine Nutzung des Roboters in seinem Lieferzustand, sondern auch die mitgelieferten und erweiternden Bibliotheken sind

²⁰Siehe Kapitel 5

²¹https://join.slack.com/t/robotdogs/shared_invite/zt-1fvixx89u-7T79~VxmDYdFSIoTnSagFQ

kaum oder unzureichend beschrieben. Viele Bibliotheken zur Erweiterung der Grundfunktion sind so beispielsweise kaum kommentiert oder dokumentiert. Diese Herausforderung im Umgang mit dem Go1 soll im Laufe der Arbeit für alle Grundfunktionalitäten und für die Erweiterungen in Kapitel 5 beseitigt werden. Ziel der Arbeit ist es unter anderem, die Nutzung und Arbeit am Go1 so zu dokumentieren, dass er im Hochschulumfeld zukünftig effizienter genutzt werden kann - als eigenständiger Teil des Ökosystems, aber auch als Erweiterung der Lehre.

Ziel in
Einlei-
tung
aufneh-
men

Veraltete Ressourcen und Bibliotheken

Der 2021 veröffentlichte Go1 ist in den vergangenen Jahren, inklusive der nur zu schätzenden Entwicklungszeit des Roboters durch die Firma *Unitree Robotics*, in seinem Softwarestand teilweise gravierend veraltet. Der Softwareanteil des Roboters wird in Kapitel 3.3 in Verbindung mit den verbauten Hardwarekomponenten genauer betrachtet, weshalb hier nur zwei Probleme exemplarisch dargestellt werden.

1. Betriebssysteme

Auf den internen Rechnern des Go1 ist ausschließlich Debianbasierte Software installiert, deren Stand mittlerweile veraltet und kaum noch gepflegt ist. Teile der installierten Bibliotheken sind dadurch außer Wartung genommen oder länger nicht aktualisiert worden. Das ist besonders in der Betrachtung der Sicherheit des Roboters relevant und kann zu unerwarteten Problemen führen. Eine Aktualisierung ist aufgrund der komplexen Konfigurationen und der Vielzahl an nachinstallierten Bibliotheken nicht trivial.

2. **Robotik Software** Ähnlich zur Problematik der Betriebssysteme ist die Software zur Steuerung des Roboters - ROS - in der ersten Version installiert. Diese ist seit längerer Zeit durch den Nachfolger ROS 2 abgelöst und mit moderner Software und dritten Bibliotheken und Erweiterungen kaum noch kompatibel. Das schränkt die Nutzung des Roboters stark ein und hatte sogar zur Folge, dass nur für dieses Problem eine Adapter-Bibliothek vom Hersteller selbst entwickelt wurde²².

Ähnliche Probleme lassen sich in vielen Bestandteilen des Roboters wiederfinden und erschweren somit die Arbeit am Gerät. Diese Arbeit wird sich nur entfernt mit der Aktualisierung des Bestandes beschäftigen. Stattdessen wird in den Erweiterungen - wo relevant - in Kapitel 5 der Umgang mit der veralteten Software beschrieben.

²²Siehe Kapitel 2.2.3

Unzureichende Qualität der Bestandsfunktionen

Parallel zur mangelnden Qualität der Dokumentation steht die unzureichende Qualität der Bestandsfunktionen. Gemeint sind hiermit alle Funktionen, die ab Werk zur Auslieferung des Go1 verfügbar und funktionstüchtig waren. Darunter fallen Funktionen wie das Fortbewegen, die Kamerabildübertragung, die Sensorik und die Autonomie in der Verarbeitung und Reaktion auf gesammelte Daten. Einzeln betrachtet erfüllen alle Funktionen die Minimalanforderungen, kombiniert man jedoch einige Funktionen, so lässt die Qualität der Ergebnisse jeder einzelnen Funktion stark nach. Gründe hierfür sind oftmals die unausgewogene Zuteilung der Ressourcen bei parallel laufenden Prozessen, welche sowohl zu hoher Auslastung der Recheneinheiten als auch zur grundlegend hohen Auslastung aller Bausteine im Gesamten führt. Besonders im Bereich der Kombinationen aus Fortbewegung und Rechenleistung für Auswertungen der Videodaten und Sensorik kommt es häufig zu sogenanntem *Throttling* der Recheneinheiten aufgrund von Überhitzung der Bauteile durch die thermischen Emissionen der mechanischen Bauteile. Jedoch auch die mangelnde Qualität der verbauten Teile des Go1 lässt die teils durchaus ausreichend gute Implementierung der Funktionen auf Softwareseite an ihre Grenzen kommen.

definition
ergän-
zen

Teile dieser Arbeit beschäftigen sich mit der effizienten Auslagerung mancher Funktionen, um die Ressourcen des Roboters sinnvoll einzusetzen und in möglichen Teilbereichen zu schonen. Die verbauten Teile des Roboters sowie die eingesetzte Software wird - wo relevant für die aufgezeigten Erweiterungen und Funktionen des Go1 auf ihre Effizienz und Einsatzfähigkeit bewertet.

Energetische und mechanische Komplexität

Die Nutzung der biologisch inspirierten vier Beine des Roboters mit hoher Flexibilität in der Rotation und des Bewegungsradius eines jeden Gelenkes bietet hinsichtlich der Vielseitigkeit der Fortbewegung und Reaktionsmöglichkeit auf schwer zu überwindendes Terrain einen großen Vorteil gegenüber einfacheren Lösungen in der Robotik, wie Rädern oder Ketten. Die präzise Steuerung der Motoren im gegenseitigen Zusammenspiel hingegen birgt mit ihrer Komplexität einen enormen Nachteil gegenüber anderer Fortbewegungsmöglichkeiten. Nicht nur ist der Bewegungsablauf deutlich aufwändiger zu implementieren, sondern sind die Motoren in ihrer Vielzahl auch um einiges Energieineffizienter, als einfachere Bewegungsabläufe, wie die Rotation in einer Achse auf Rädern. Änderungen der Standardabläufe der Fortbewegung sind somit schwerer zu implementieren. Auch die Ausdauer des verbauten Batteriesystems leidet unter dem hohen Energieaufwand der Motoren und Recheneinheiten

des Roboters. Ausdauernde oder vollkommen autonome Prozesse sind somit nur bedingt möglich, auch aufgrund der Notwendigkeit eines manuellen Batteriewechsels nach vollständiger Entladung.

Aufgrund des fehlenden oder mindestens mangelnden Schutzes des Roboters bei niedriger Ladung der eingesetzten Batterie beschäftigt sich diese Arbeit im Sinne dieser Herausforderung mit der Absicherung und Resilienz besonders des Batteriesystems gegenüber²³. Im Sinne der sinnvollen Integration des Go1 in ein Hochschulökosystem werden die oben genannten Herausforderungen kritisch betrachtet und, wenn im Laufe der Arbeit sinnvoll, auch bewertet. Im folgenden Kapitel wird der Kern der Arbeit, der Go1 präzise analysiert und beschrieben, sodass für den weiteren Verlauf der Arbeit die Kenntnis des Roboters ausreichend ist, um den Schilderungen der Erweiterungen zu folgen.

²³Siehe Kapitel 5

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.

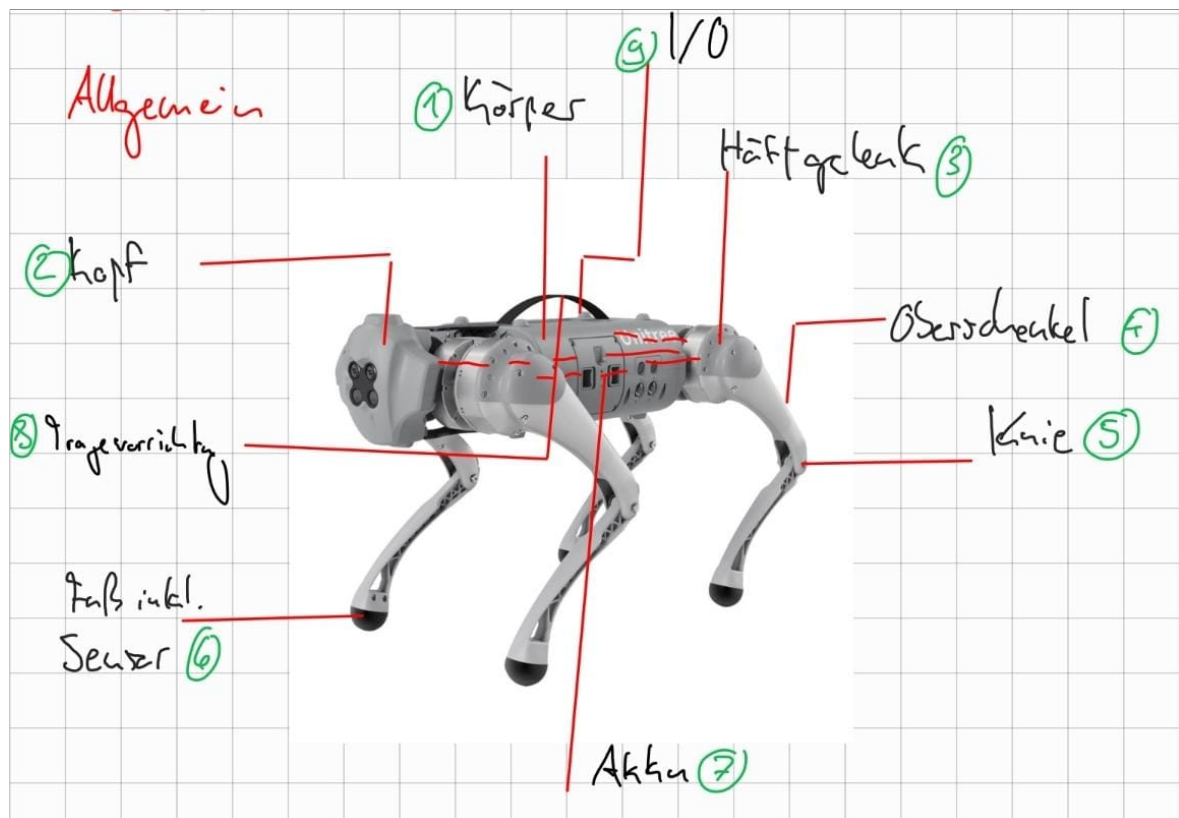


Abbildung 2: Überblick über den Go1

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:

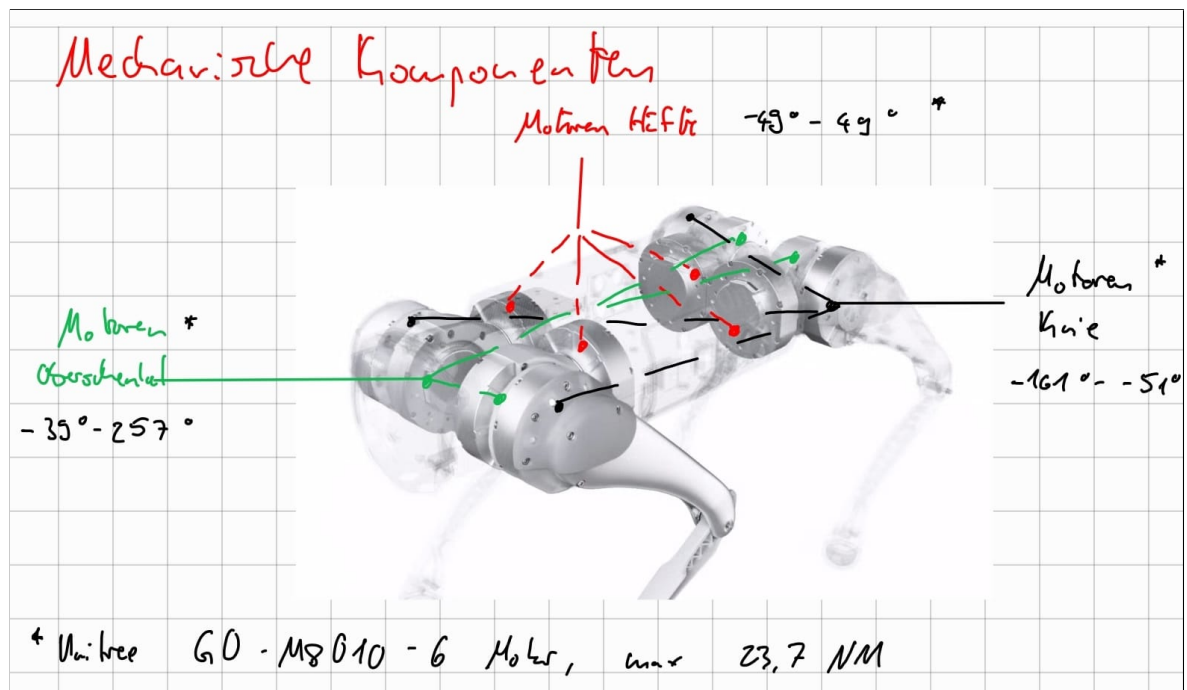
- Interne Hardwarekomponenten
- Intelligenter Akku
- Teile der Sensorik und Kameras
- Hüftgelenke und Motoren der Beine

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



Validieren
ob
starre
und
Seilzug
Verbin-
dung
genutzt
werden

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*²⁴. 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° bis 49°

2. Oberschenkelmotoren

Bewegungsradius von -39° bis 257°

3. Kniemotoren

Bewegungsradius von -161° bis -51°

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 3.3.3 ist erkennbar, dass die zwölf Motoren des Go1 über eine RS-485 Schnittstelle mit der MCU verbunden sind. Diese wertet die In-

²⁴Unitree Robotics. *GO-M8010-6 Motor* - Unitree Robotics. URL: <https://shop.unitree.com/products/go1-motor> (besucht am 07. 07. 2023).

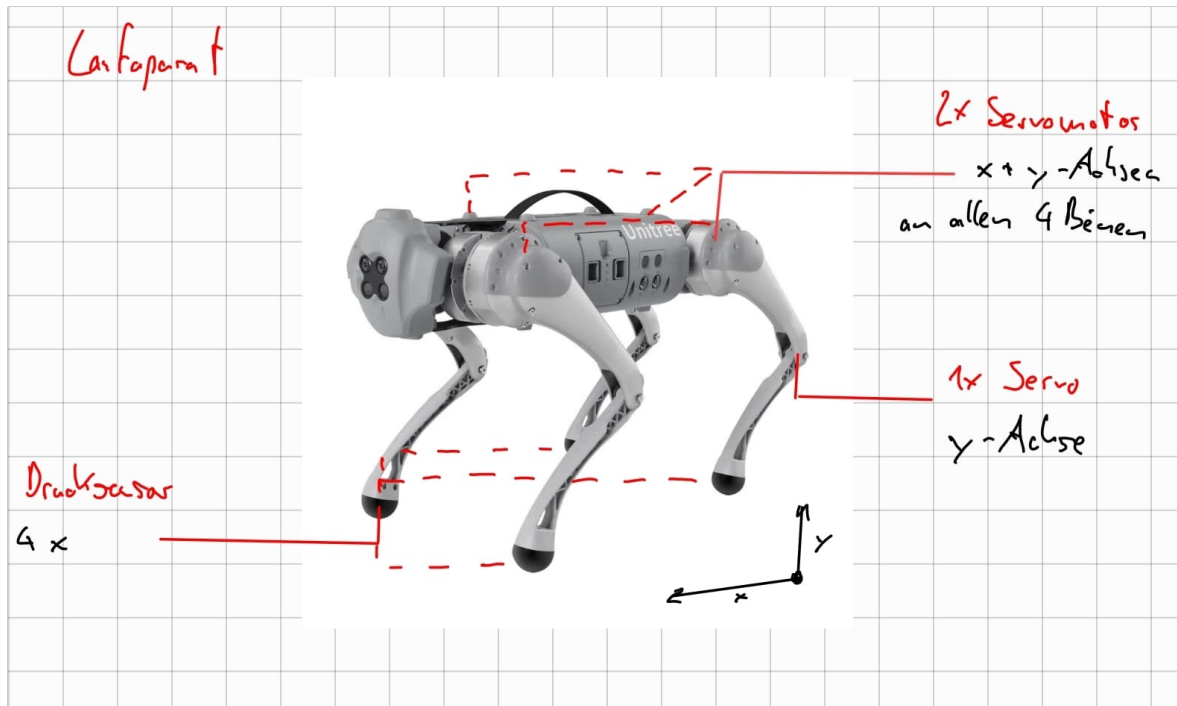


Abbildung 4: Sensorik und Daten des Laufapparats

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*).

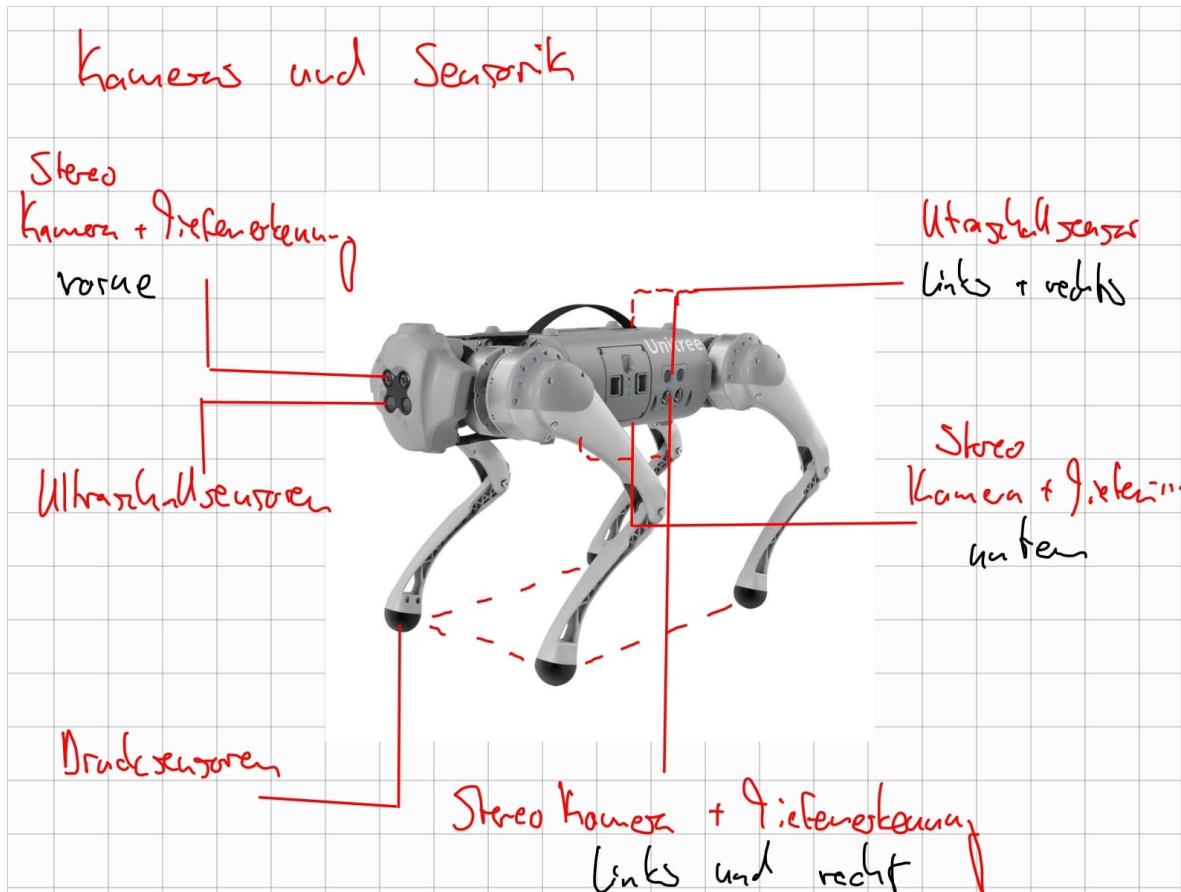


Abbildung 5: Darstellung der verbauten Kamera und Sensorik

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.

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

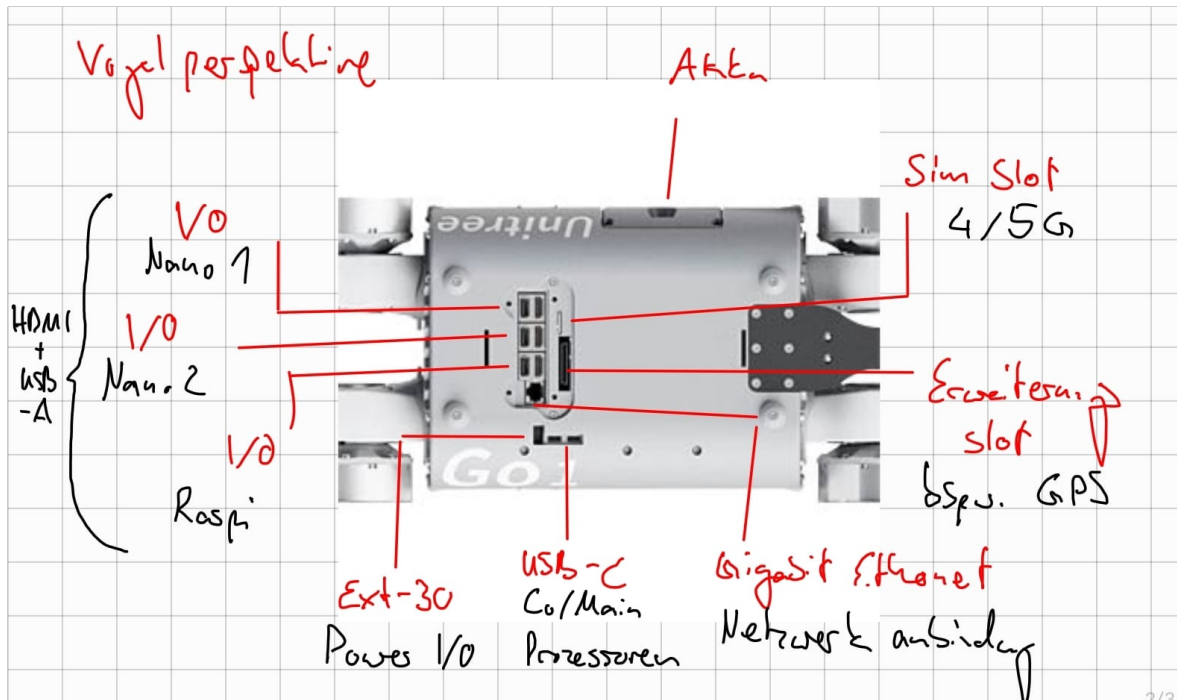


Abbildung 6: Vogelperspektive mit Hardware

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?

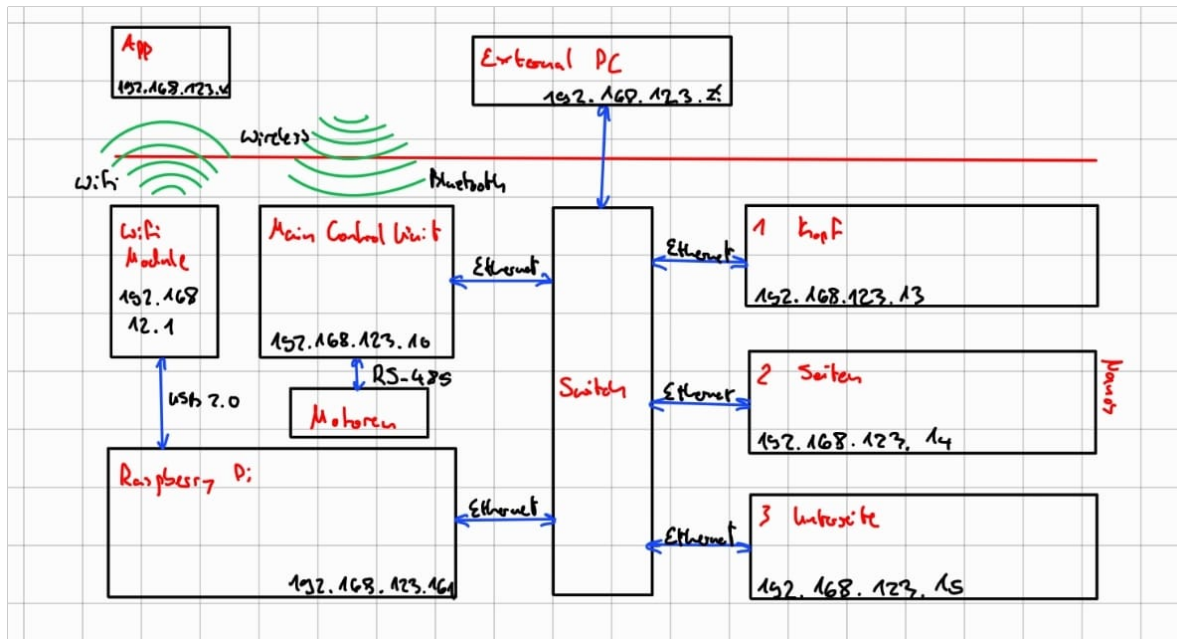


Abbildung 7: Überblick über Netzwerkkonfiguration

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 3.3.4.

3.3.4 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] Gerardo Bledt u. a. „MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot“. In: *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2018, S. 2245–2252. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593885.
- [5] Boston Dynamics. *Legacy Robots*. URL: <https://bostondynamics.com/legacy/> (besucht am 08.08.2023).
- [6] Boston Dynamics. „Robotics’ Role in Public Safety. How robots like Boston Dynamics’ Spot are keeping people safe.“ In: (2023).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] Srijeet Halder u. a. „Real-Time and Remote Construction Progress Monitoring with a Quadruped Robot Using Augmented Reality“. In: *Buildings* (Dez. 2022). URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12112027>.
- [10] Devan Joseph. „MIT reveals how its military-funded Cheetah robot can now jump over obstacles on its own“. In: *Business Insider* (3. Juni 2015).
- [11] Lee Milburn, Juan Gamba und Claudio Semini. *Towards Computer-Vision Based Vineyard Navigation for Quadruped Robots*. Dynamic Legged Systems Lab - Istituto Italiano di Tecnologia Genova, Italy, 2. Jan. 2023.
- [12] 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).
- [13] VDI-Gesellschaft Produktionstechnik. *VDI 2860/ Montage- und Handhabungstechnik. Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbol*. Beuth Verlag, 1990.
- [14] Marc Raibert u. a. *BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot*. Boston Dynamics, 8. Apr. 2008.
- [15] Unitree Robotics. *GO-M8010-6 Motor - Unitree Robotics*. URL: <https://shop.unitree.com/products/go1-motor> (besucht am 07.07.2023).

- [16] Unitree Robotics. *GO1 Manuals - GO1 Tutorials 1.0.0 documentation*. URL: <https://www.docs.quadruped.de/projects/go1/html/index.html> (besucht am 08.08.2023).