

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, 14. August 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Robotik	2
2.1.1	Industrieroboter	3
2.1.2	Serviceroboter	4
2.1.3	Cobots	4
2.2	Stand der Forschung	5
2.2.1	Quadruped Roboter	5
2.2.2	Integration von Robotern	7
2.2.3	Unitree Go1 Ressourcen	9
2.3	Herausforderungen	12
3	Roboterarchitektur und Systemkomponenten	16
3.1	Aufbau	16
3.1.1	Überblick	16
3.1.2	Mechanische Komponenten	18
3.1.3	Sensorik	19
3.1.4	Recheneinheiten und Schnittstellen	22
3.2	Hardware Architektur	25
3.2.1	Überblick	26
3.2.2	Kernelemente	27
3.2.3	Netzwerk	33
3.3	Limitierungen	35
3.3.1	Rechenleistung	35
3.3.2	Physische Limitierungen	35
4	Analyse des Roboters	36
4.1	Inbetriebnahme	36
4.2	Vorgehensweise	36
4.3	Funktionen	36
4.3.1	Fernsteuerung	36
4.3.2	Lokales Netzwerk	36
4.3.3	Monitoring	36
4.3.4	Audio Interfaces	36
4.3.5	LED	36
4.3.6	Video Streaming	36
4.3.7	Sensorik	36
4.3.8	Batterie Management	37
5	Funktionserweiterungen und Integration	38
5.1	Vorbereitungen	38
5.1.1	Externer Server	38
5.1.2	Protokolle	38

5.2	Resilienz	38
5.2.1	BMS	38
5.3	Konnektivität	38
5.3.1	Wifi	38
5.3.2	GSM	38
5.3.3	Bluetooth	38
5.3.4	Resilienz	38
5.4	Funktionsauslagerung	38
5.4.1	Auslagerung Rechenleistung	38
5.4.2	Fernsteuerung	38
5.4.3	Synchronisation	38
5.4.4	RTSP Server	38
6	Fazit	39
6.1	Rückblick	39
6.2	Einschätzung	39
6.3	Potential	39
6.4	Nächste Schritte	39
6.4.1	Software Upgrades	39
A	Listings	41

Abbildungsverzeichnis

1	Vergleich zwischen Industrie- und Servicerobotern	3
2	Überblick über den Go1	16
3	Mechanische Komponenten des Go1	18
4	Sensorik des Laufapparats	20
5	Darstellung der verbauten Kamera und Sensorik	21
6	Blick auf die internen Komponenten	23
7	Ansicht des Kopfes von hinten	24
8	Vogelperspektive mit Hardware	25
9	Überblick über die interne Architektur des Go1	26
10	Überblick über Netzwerkkonfiguration	34

Abkürzungsverzeichnis

BMS	Batterie Management System	22, 26
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency	5, 6
GB	Gigabyte	28, 29, 30, 32
Go1	Unitree Robotics Go1 Edu	2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 30, 32, 33
GPS	Global Positioning System	24
HDMI	High Definition Multimedia Interface	25
IP	Internet Protocoll	27, 28, 30, 34, 35
LED	Leuchtdioden	23, 27, 30
Lidar	Light Detection and Ranging	8
LTE	Long Term Evolution	25
MCU	Main Control Unit	19, 20, 22, 24, 26, 27, 34
MIT	Massachusetts Institute of Technology	6, 11
ML	Machine Learning	36
NM	Newton/Meter	19
PDF	Portable Document Format	10

RAM	Random Access Memory	34
RCTA	Robotics Collaborative Technology Alliance	6
ROI	Return on Investment	4, 5
ROS	Robot Operation System	10, 13
SD	Secure Digital	28, 29, 31, 32
SSH	Secure Shell	28
US	United States	6, 7
USA	Vereinigte Staaten von Amerika	5
USB	Universal Serial Bus	24, 25, 30
VDI	Verband Deutscher Ingenieure	2
WWAN	Wireless Wide Area Network	33, 35

Listings

1	buffer-overflow.c: C Programm Buffer Overflow	41
---	---	----

Tabellenverzeichnis

1	Kenndaten des Raspberry Pi	29
2	Kenndaten des Nvidia Jetson Nano im Kopf des Roboters	32

1 Einleitung

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 (Unitree Robotics Go1 Edu) 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 sind¹.

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

¹VDI-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 1² zeigt die beiden Klassifizierungen und deren Eigenschaften im Überblick.

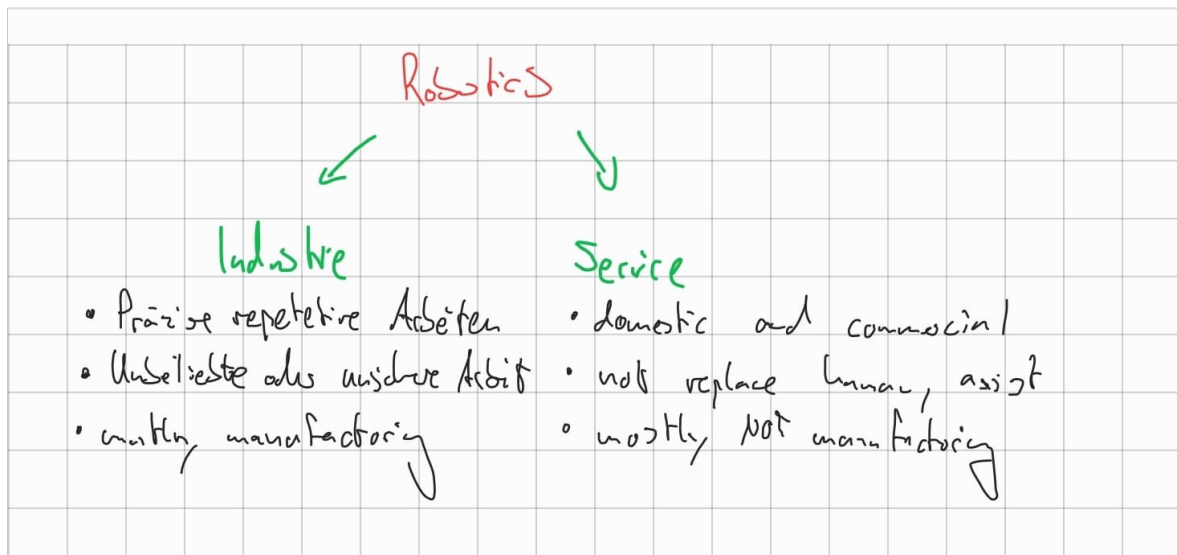


Abbildung 1: Vergleich zwischen Industrie- und Servicerobotern

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.

²Sophie 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).

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 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 unterscheiden³.

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 GoI in dieser Arbeit nicht einzuschränken. Wie bereits erarbeitet kann man den GoI 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 GoI als Serviceroboter nicht widerspricht, ist *Cobot*. *Cobot* setzt sich aus dem Englischen Wort *collaborate* - (zusammenarbeiten, kollaborieren) und dem Wort *Roboter* zusammen. Einige Merkmale sind:⁴

³Fischer, s. Anm. 2.

⁴Fischer, s. Anm. 2.

- Kollaborativ und sicher, im Gegensatz zu stationär und abgesichert
- Interaktiv und adaptiv zur Umgebung
- 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 Lautsprechern⁵ 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
Quadruped

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

⁵Siehe Kapitel 3.1.3

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* 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.^{6,7}

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^{8,9}. 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.¹⁰ 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

Akademisch
for-
schung
als
fokus

⁶Marc Raibert u. a. *BigDog, the Rough-Terrain Quaduped Robot*. Boston Dynamics, 8. Apr. 2008.

⁷Defense 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).

⁸Devan Joseph. „MIT reveals how its military-funded Cheetah robot can now jump over obstacles on its own“. In: *Business Insider* (3. Juni 2015).

⁹Defense Advanced Research Projects Agency. *Maximum Mobility and Manipulation (M3)*. URL: <https://www.darpa.mil/program/maximum-mobility-and-manipulation> (besucht am 07. 08. 2023).

¹⁰Jason 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).

ist die Kompaktheit seinen Vorgängern gegenüber. Die aktuelle Version des *Spot* ist bereits kommerziell verfügbar und wurde initial für etwa 75 000 US-Dollar¹¹ zum Kauf beworben.¹²

Die Veranschaulichung *The Rise of the Robot Quadrupeds* gibt einen Überblick über die Zeitschiene der einflussreichsten Implementierungen von Quadruped Robotern in der jüngeren Vergangenheit¹³.

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

¹¹Evan 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).

¹²Boston Dynamics. *Legacy Robots*. URL: <https://bostondynamics.com/legacy/> (besucht am 08.08.2023).

¹³Jeremy 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).

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 Monitoring möglich ist, bei dem sich nur der Roboter mit Sensorik und Kameras vor Ort befinden muss.¹⁴

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.¹⁵

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

¹⁴Srijeet 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>.

¹⁵Boston Dynamics. „Robotics’ Role in Public Safety. How robots like Boston Dynamics’ Spot are keeping people safe.“ In: (2023).

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 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.¹⁶ 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

¹⁶Raibert u. a., s. Anm. 6.

und können eine gute Grundlage und Ergänzung zu den Ergebnissen im Verlauf der Arbeit bieten.

Offizielle Dokumentation

Die Webseite <https://www.docs.quadruped.de/projects/go1/html/index.html>¹⁷ 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

¹⁷Unitree 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).

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.

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 hilfreich¹⁸.

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

¹⁸<https://github.com/mit-biomimetics/Cheetah-Software>

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 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 Monitoring¹⁹.

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*²⁰. 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

¹⁹Siehe Kapitel 5

²⁰https://join.slack.com/t/robotdogs/shared_invite/zt-1fvixx89u-7T79~VxmDYdFSIoTnSagFQ

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 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 3.2 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 wurde²¹.

²¹Siehe Kapitel 2.2.3

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.

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 gegenüber²². 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.

²²Siehe Kapitel 5

3 Roboterarchitektur und Systemkomponenten

Folgendes Kapitel beschreibt den physischen Aufbau des Go1 und die Konfiguration desselben 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 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.

KAum
verwen-
dete
referenz

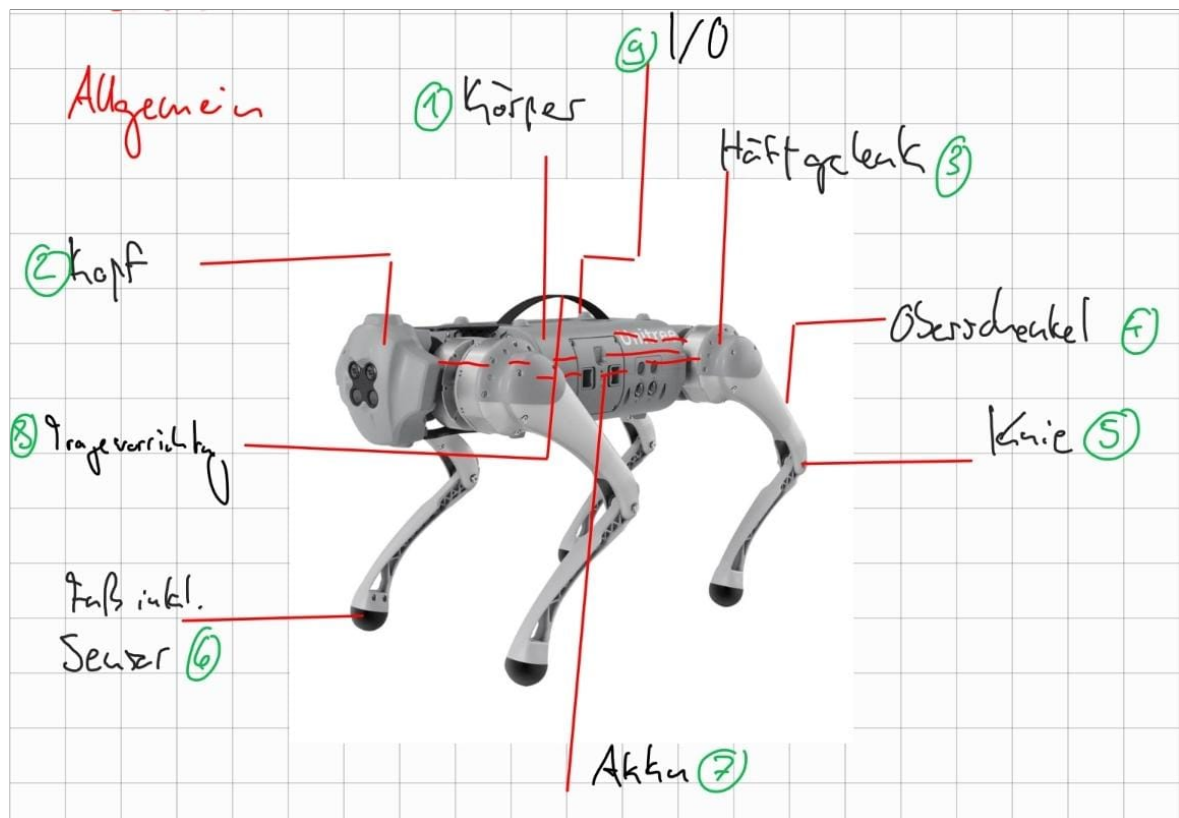


Abbildung 2: Überblick über den Go1

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:

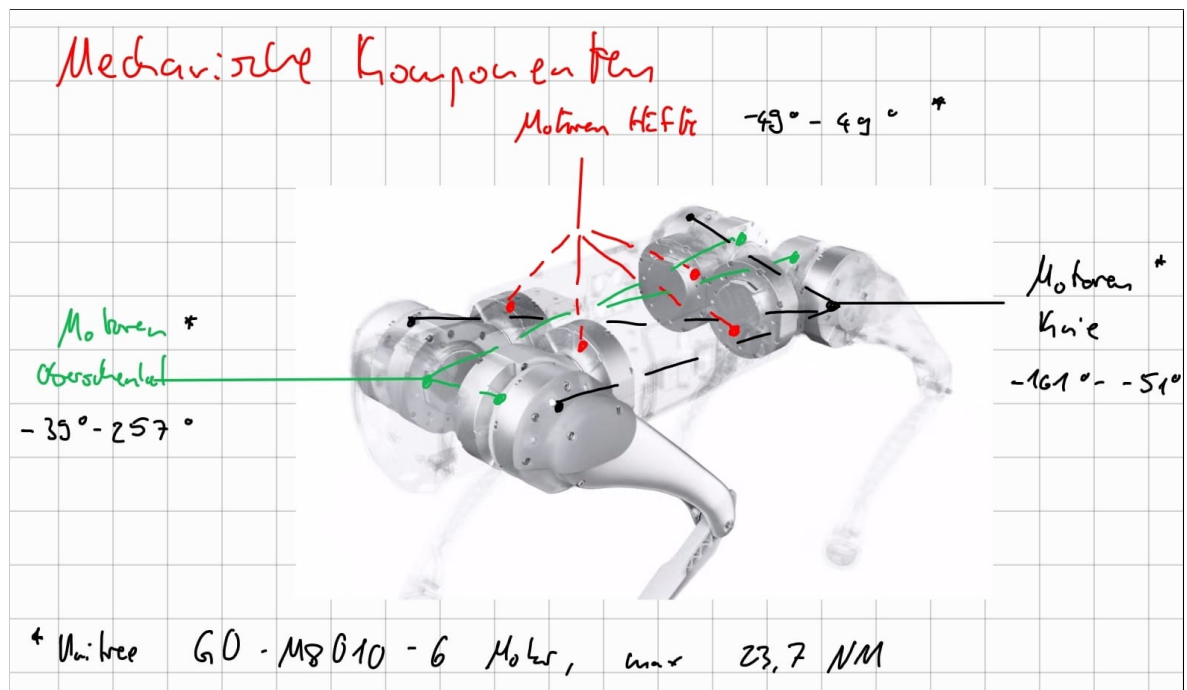
- Interne Hardwarekomponenten
- Intelligenter Akku
- Teile der Sensorik und Kameras
- Hüftgelenke und Motoren der Beine

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*²³. 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 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 integriert. 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 10 in Kapitel 3.2.3 ist erkennbar, dass die zwölf Motoren des Go1 über eine *RS-485* Schnittstelle mit der MCU verbunden sind. Diese wartet die

²³Unitree Robotics. *GO-M8010-6 Motor* - Unitree Robotics. URL: <https://shop.unitree.com/products/go1-motor> (besucht am 07. 07. 2023).

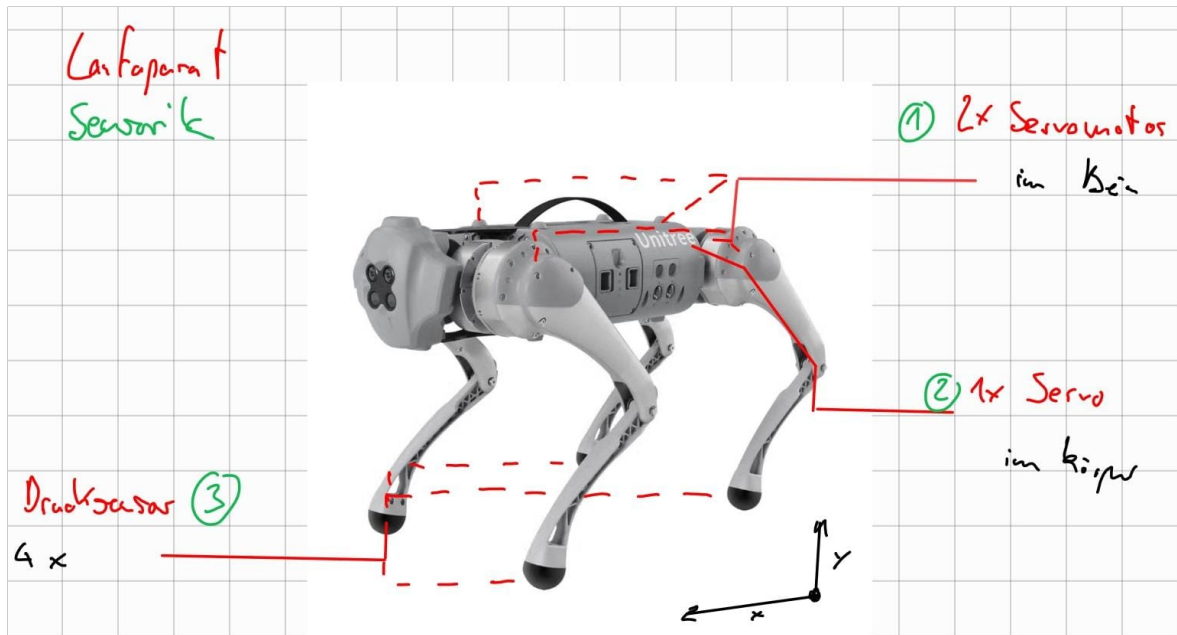


Abbildung 4: Sensorik des Laufapparats

Informationen aus und steuert die einzelnen Motoren über dieselbe Schnittstelle an. Bei Rotationsbewegungen messen die Motoren, welche Kraft für die Ausführung benötigt wird und was die Differenz zur erwarteten Kraft ist. So können die Motoren allein bereits eine ausreichende Datenmenge zur Steuerung des Bewegungsapparats liefern.

Als Ergänzung zur intelligenten Messung der Motoren sind in den Enden aller vier Beine ③ Drucksensoren verbaut, welche die erzeugte Kraft auf die Unterseite der Beine messen und an die MCU senden. Die Kombination der Rotationsdaten und -kräfte sowie der gemessenen Kräfte an den Enden der Beine ermöglichen es dem Go1, die Motoren zum Ausgleich der Bewegungen anzusteuern und somit eine möglichst effiziente Fortbewegung zu ermöglichen.

Neben der integrierten Sensorik zur Steuerung des Laufapparats sind im Go1 Kameras, Ultraschallsensoren und Audiotechnik verbaut worden. Abbildung 5 zeigt hier die Verteilung der Kameras und Ultraschallsensoren.

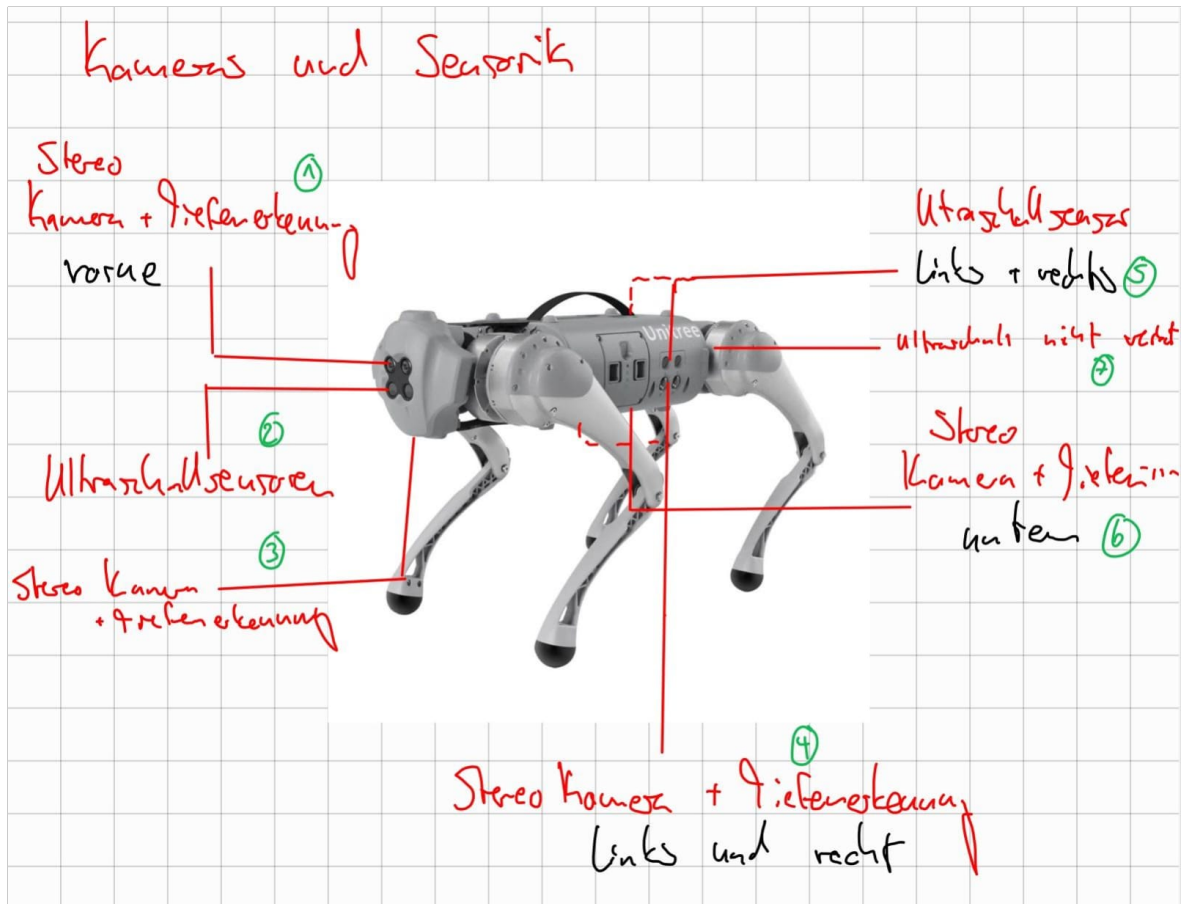


Abbildung 5: Darstellung der verbauten Kamera und Sensorik

Insgesamt sind im Go1 fünf Stereokamerasysteme verbaut, die durch ihre doppelte Bauart ebenso zur Tiefenerkennung fähig sind. Die Kameras sind folgendermaßen verteilt:

- ① Kopfeinheit nach vorne gerichtet
- ③ Kopfeinheit nach unten gerichtet
- ④ Rumpf links und rechts
- ⑥ Rumpf nach unten gerichtet

Die Kameras am Kopf des Go1 ① und ③ werden durch den Jetson Nano im Kopf gesteuert, die beiden nach außen gerichteten Kameras ④ von einem weiteren Nano und die Kamera am Rumpf nach unten gerichtet ⑥ vom letzten

der drei verbauten Nanos.²⁴ Mehr zur Steuerung und den Funktionen der Kameras und Recheneinheiten in Kapitel 3.2 und 4.3.6. Unter drei der fünf Kamerasysteme sind Ultraschallsensoren verbaut. Diese sind am Kopf nach vorne gerichtet ② und am Körper zu den Seiten gerichtet ⑤ verbaut. Laut der Dokumentation der Ultraschallsensoren ist softwareseitig ein weiteres Ultraschallmodul am Rumpf nach hinten gerichtet ⑦ vorgesehen, welches aber hardwareseitig nie realisiert wurde²⁵.

Prüfen, ob die seitlichen Ultraschall gekabelt und ansprechbar sind

Die Ultraschalleinheit im Kopf des Roboters wird vom Jetson Nano im Kopf des Roboters gesteuert während die beiden seitlichen Sensoren mit dem Raspberry Pi im Rumpf des Go1 verbunden sind.

3.1.4 Recheneinheiten und Schnittstellen

Die *Edu* Version des Go1 ist mit einiger integrierter Rechenleistung versehen worden. Innerhalb des Rumpfes und des Kopfes sind diverse Kleinplatinen-rechner verbaut worden, um beispielsweise die Daten der oben beschriebenen Sensoren zu verwerten, den Bewegungsapparat manuell zu manipulieren und dem Roboter weitere Funktionen hinzuzufügen. Abbildung 6 zeigt die interne Zusammensetzung des Go1.

Herzstück des Roboters ist die MCU ①, welche auf der rechten Seite des Rumpfes verbaut ist. Diese steuert die Motoren und greift Daten des BMS (Batterie Management System) ② über den intelligenten Akku²⁶ ab. Mittig hinter dem eingebauten Akku liegt die Kernschnittstelle des Go1 mit den Nutzern, der verbaute *Raspberry Pi* ③. Dieser ist direkt über eine Erweiterungsplatine ⑥ für Schnittstellen und feste Verbindungen mit den beiden im Rumpf verbauten *Nvidia Jetson Nanos* ④+⑤ verbunden. Über gekabelte Verbindungen entlang des für den Akku reservierten Platzes im Rumpf verläuft

²⁴Development and use of Go1 binocular fisheye camera. Unitree Robotics.

²⁵Development and use of Go1 ultrasonic module. Unitree Robotics.

²⁶Abbildung 8 ①

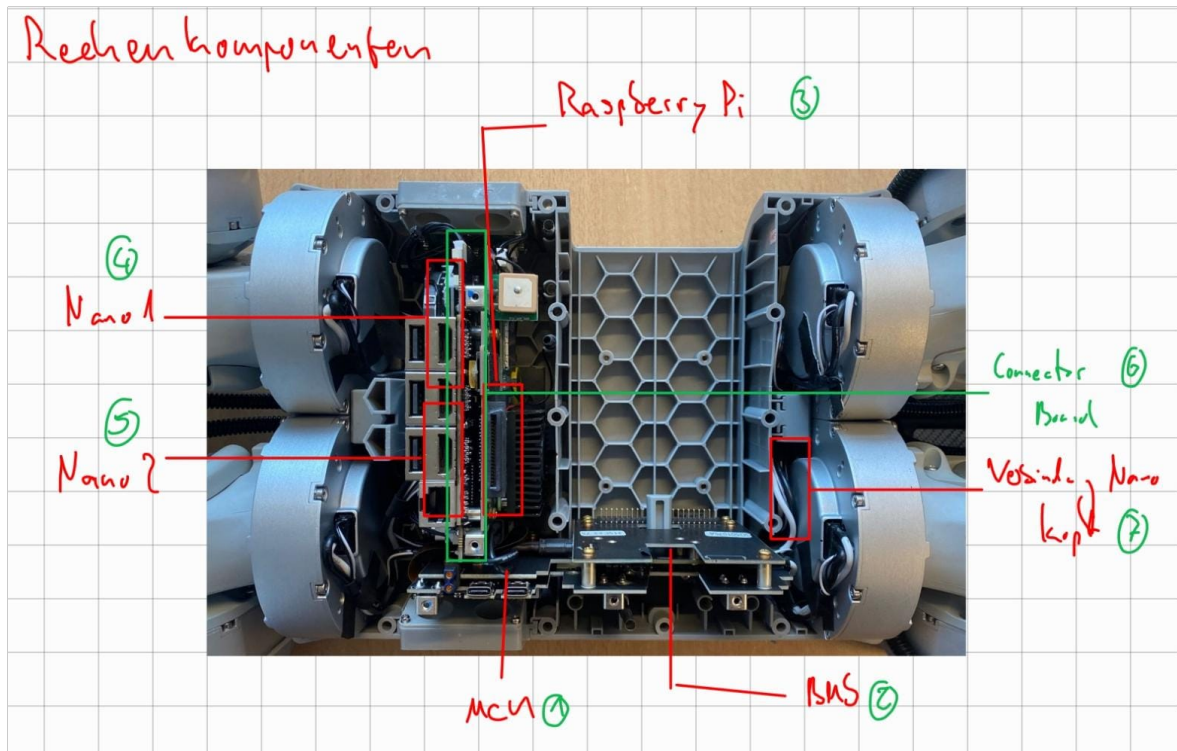


Abbildung 6: Blick auf die internen Komponenten

die gekabelte Verbindung ⑦ zwischen den im Rumpf verbauten Komponenten und dem Kopf des Roboters. Abbildung 7 zeigt die restlichen im Kopf verbauten Komponenten des Hundes.

Die zentrale Steuereinheit der Komponenten im Kopf des Roboters ist der verbaute *Nvidia Jetson Nano* ①, der über gekabelte Verbindungen ② mit den im Rumpf verbauten Komponenten verbunden ist. Direkt an den Nano ist ein Lautsprecher ③ verbaut, der im *Edu-Modell* frei nutzbar ist²⁷. Ebenso direkt an den Nano angeschlossen sind links und rechts am Kopf zwei nach hinten und zur Seite orientierten LED (Leuchtdioden)-Arrays. Auch diese sind frei programmierbar²⁸. Eine detailliertere Beschreibung der Recheneinheiten und derer Funktionen folgt in Kapitel 3.2.

Auf der Oberseite des Go1 sind einige Schnittstellen verbaut, die die Arbeit an den internen Komponenten und Recheneinheiten des Roboters erleich-

²⁷Siehe Kapitel 4.3.4

²⁸Kapitel 4.3.5

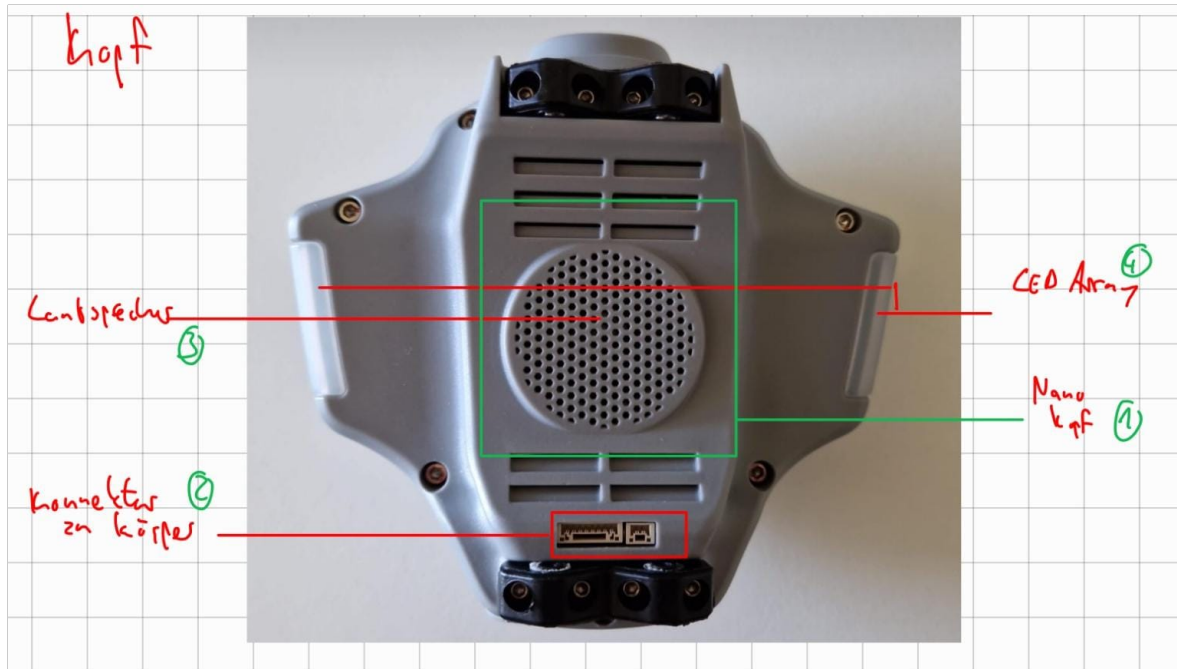


Abbildung 7: Ansicht des Kopfes von hinten

tern sollen. Abbildung 8 zeigt die Oberseite und die verbauten Schnittstellen. Alternativ zur Stromversorgung über den verbauten Akku ① auf der linken Außenseite des Roboters ist eine *EXT-30*-Steckverbindung ② auf der Oberseite verbaut. Diese kann entweder den Go1 anstelle des Akkus betreiben oder externe Erweiterungen durch den Akku mit Strom versorgen. Genauer hierzu in Kapitel 4.1. Direkt oberhalb dieser Verbindung sind zwei USB (Universal Serial Bus) *Typ C* Ports ③, welche als Schnittstellen zur MCU genutzt werden können. Erweiterungen, wie beispielsweise GPS (Global Positioning System)-Module können über eine serielle Schnittstelle ④ angeschlossen werden.

Zur gekabelten Verbindung eines externen Rechners mit dem intern verbaute Switch und somit den Recheneinheiten²⁹ ist eine *RJ-45*-Ethernetbuchse ⑤ verbaut. Als Alternative zum kabellosen Netzwerk kann für eine Verbindung mit dem Internet oder einem Mobilfunknetzwerk der eingebaute Steckplatz

²⁹Siehe Kapitel 3.2.3

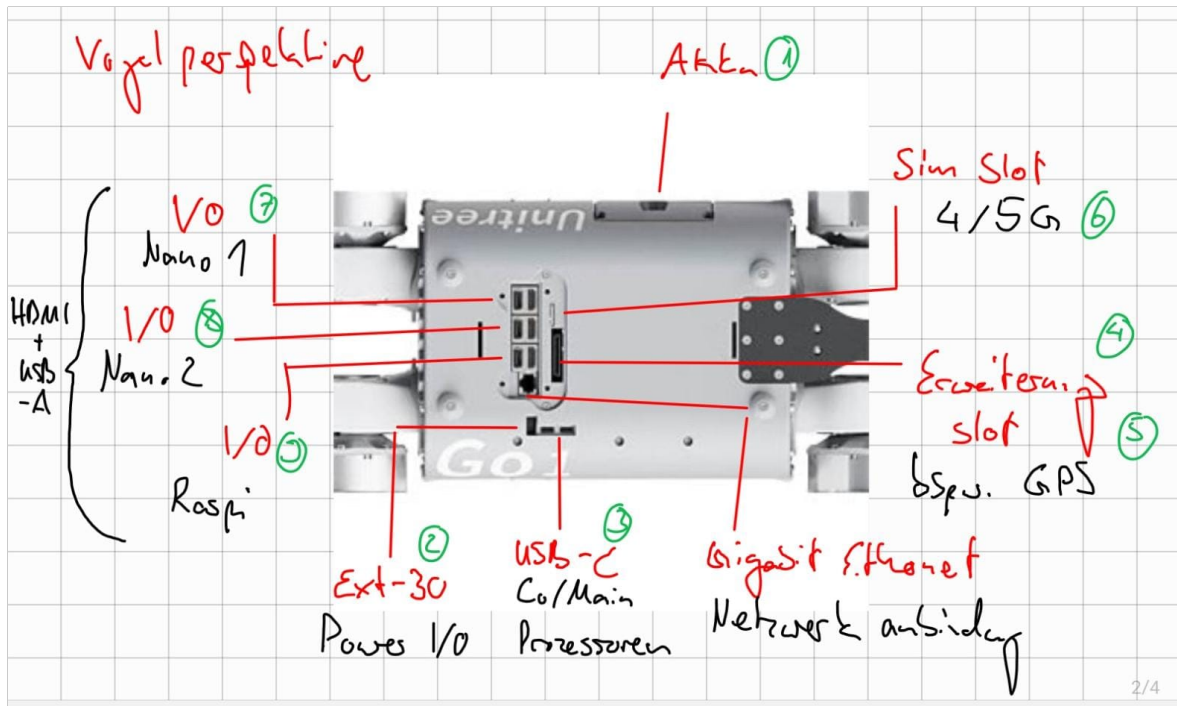


Abbildung 8: Vogelperspektive mit Hardware

für 4G/ LTE (*Long Term Evolution*)-Karten ⑥ verwendet werden. Dieser ist direkt mit dem verbauten Raspberry Pi verbunden³⁰.

Die restlichen Verbindungen auf der Rückseite des Rumpfes sind drei Paare mit je einem HDMI (High Definition Multimedia Interface) und einem USB-A Port Für die direkte Verbindung zu den Kleinplatinenrechnern durch Entwickler. Die Verteilung ist wie folgt:

- ⑦ Nvidia Jetson Nano 1 ()
- ⑧ Nvidia Jetson Nano 2 ()
- ⑨ Raspberry Pi

3.2 Hardware Architektur

Im folgenden Kapitel wird der Aufbau des intern verbauten Hardware-Systems und die Funktion der einzelnen Bauteile dessen dargestellt. Hierfür wird

³⁰Siehe Kapitel 5.3.2

Nano,
welcher
ist wer
in port
vertei-
lung

vorerst ein kurzer Überblick über die Komponenten und ihren Zusammenhang geschaffen, was sich in Teilen mit der Ausführung im vorigen Kapitel 3.1.4 überschneidet. Mit dem geschaffenen Überblick werden die Einzelteile des System genauer betrachtet und dokumentiert. Dies soll über die einfache Dokumentation des Herstellers deutlich hinaus gehen. Abschließend wird die interne Kommunikation der Bauteile in sich und mit externen Komponenten beschrieben.

3.2.1 Überblick

Als Einstieg in den Überblick soll veranschaulichend Abbildung 9 dienen. Sie zeigt die einzelnen Komponenten und ihre Verbindungen untereinander und zu den erweiterten Systemen wie dem BMS oder der Sensorik.

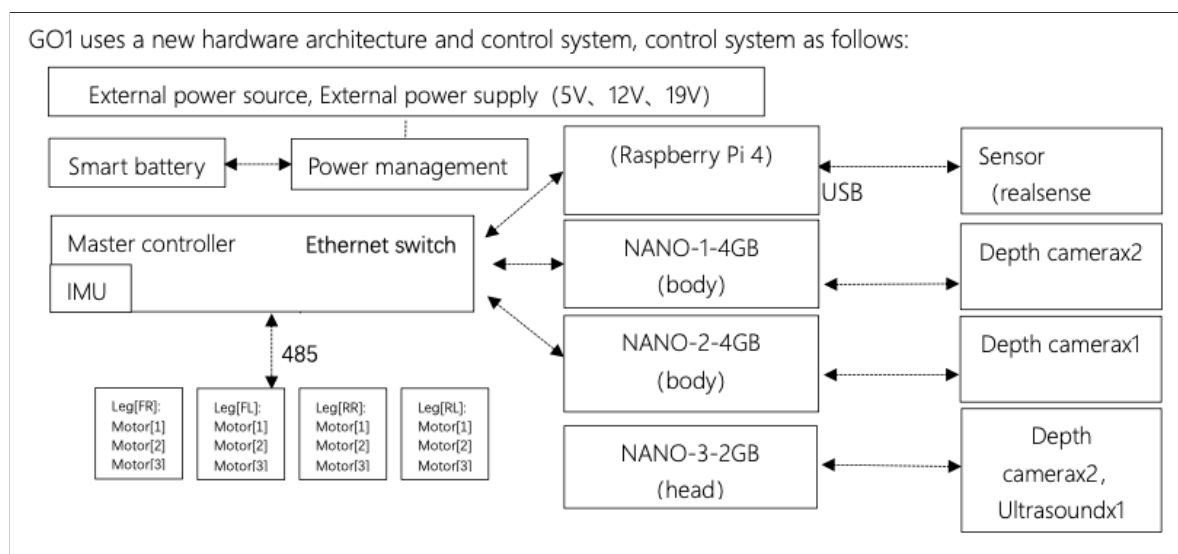


Abbildung 9: Überblick über die interne Architektur des Go1

Als Grundlage für sowohl die interne Hardware als auch die mechanischen Komponenten dienen die MCU und das BMS. Beide werden vom Hersteller nicht für den Zugriff freigeschaltet und können indirekt verwendet werden. So können beispielsweise die Daten der Motoren und deren Steuerung aktuell nur über Bibliotheken gelesen und manipuliert werden. Auch die Daten des BMS sind nur lesend verfügbar. Zentral zu allen Komponenten steht ein Switch, wel-

cher diese über ein Netzwerk verbindet. Direkt daran angeschlossen sind alle drei *Nvidia Jetson Nanos*, der *Raspberry Pi*, die *MCU* und der nach außen verfügbar gemachte *RJ-45 Port*. Der *Raspberry Pi* kann als zentraler Baustein für alle Entwickler am Go1 bezeichnet werden. Bis auf dedizierte Auswertungen oder Zugriffe auf die Kameramodule werden die meisten Prozesse zumindest auf dem Pi verwaltet. Die Nanos hingegen verarbeiten die ihnen zugeordneten Kameramodule, mit der Ausnahme des Nanos im Kopf des Roboters, der zudem auch die Sensordaten des nach vorne gerichteten Ultraschallsensors abgreift und verfügbar macht. Folgende Übersicht zeigt die Verteilung der zugreifbaren Recheneinheiten zu den zu verwaltenden Bausteinen.

Raspberry Pi	Nano 1 (Kopf)	Nano 2	Nano 3
Wifi Modul Webhosting App-Verbindung Monitoring Bibliotheken Ultraschall seitlich	LED-Steuerung Audio-Ausgabe Ultraschall frontal Videoauswertung Kopf vorne/unten	Videoauswertung links + rechts	Videoauswertung Rumpf unten

Das nächste Kapitel geht auf Grundlage des Überblicks genauer auf die einzelnen Bausteine der internen Hardware des Go1 ein.

3.2.2 Kernelemente

Als Kernelemente des Go1 werden der verbaute *Raspberry Pi* und die drei verbauten *Nvidia Jetson Nanos* bezeichnet. Grundsätzlich ist die *MCU* ebenfalls als Kernelement zu bezeichnen, sie ist jedoch nicht für den Zugriff durch den Entwickler freigeschaltet und wird deshalb nicht weiter betrachtet. Zur genaueren Inspektion der Komponenten kann ein externer Rechner per *Ethernet* an den in Kapitel 3.1.4 *RJ-45-Port* angeschlossen werden. Diesem Rechner muss dann eine statische IP (Internet Protocoll)-Adresse im

welcher
Nano
wo was
wann,
links
rechts?

Netz 192.168.123.0/24 vergeben werden. Da die IP-Adresse noch nicht vergeben sein darf, wurde zur Analyse im Rahmen dieser Arbeit die Adresse 192.168.123.51 verwendet.

Raspberry Pi

Laut Hersteller-Dokumentation ist im Roboter ein *Raspberry Pi 4* verbaut. Anhand der Dokumentation erkennt man lediglich die IP-Adresse des Pi - 192.168.123.161, jedoch keine Informationen zu den Eigenschaften dessen. Zur Prüfung der Eigenschaften des Pis kann sich mit dem Roboter per Ethernet verbunden werden. Über den Standard-Nutzer kann sich laut Dokumentation per SSH (Secure Shell) auf den Roboter verbunden werden.

```
# user: pi, password: 123, root-password:123
ssh pi@192.168.123.161
```

Als Erstes soll das genaue Modell des Raspberry Pi erkannt werden:

```
pi@raspberrypi:~ $ grep Model /proc/cpuinfo
Model : Raspberry Pi Compute Module 4 Rev 1.0
```

Die Prüfung der verbauten Variante des Compute Model 4 lässt dich durch folgendes Kommando durchführen:

```
pi@raspberrypi:~ $ grep MemTotal /proc/meminfo
MemTotal: 1894664 kB
```

Eine kurze Prüfung der Herstellerwebsite zeigt uns, dass ein Broadcom BCM2711 quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz in der Variation mit 2 GB (Gigabyte) Arbeitsspeicher verbaut ist. Die Boot-Partition und der initiale Festplattenspeicher werden bei diversen Kleinplattenrechner oftmals über eine SD (Secure Digital)-Karte realisiert. Um das auf dem

Raspberry Pi zu prüfen kann die Belegung des Dateisystems ausgegeben werden. Die temporären Dateisysteme werden hierbei ausgeschlossen.

```
pi@raspberrypi:~ $ df -HTx tmpfs -x devtmpfs
Filesystem Type Size Used Avail Use% Mounted on
/dev/root ext4 32G 18G 13G 59% /
/dev/mmcblk0p1 vfat 265M 69M 196M 26% /boot
```

Zu erkennen ist, dass tatsächlich eine SD-Karte als Boot-Partition unter /dev/mmcblk0p1 eingebunden wurde. Zudem lässt sich die Gesamtgröße des Dateisystems ablesen - 32 GB. Zur Prüfung des verbauten Betriebssystems und des Linux Kernels kann folgendes Kommando verwendet werden:

```
pi@raspberrypi:~ $ grep PRETTY_NAME /etc/os-release
PRETTY_NAME="Debian GNU/Linux 10 (buster)"
pi@raspberrypi:~ $ uname -r
5.4.81-rt45-v8+
```

Zusammenfassend lassen sich die Kerndaten des Pis wie in Tabelle 1 darstellen:

Modell	Raspberry Pi Compute Module 4 Rev 1.0
SoC	Broadcom BCM2711 quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz
RAM	1 894 664 kB (1.8 GB) Arbeitsspeicher
Speicher	32 GB Festplattenspeicher über eine SD-Karte
OS	Debian 10 (Buster)
Kernel	Linux Kernel 5.4.81-rt45-v8+

Tabelle 1: Kenndaten des Raspberry Pi

Angeschlossene Hardware

Beschreibung des Home Ordners

Nvidia Jetson Nano Kopf

Folgt man der Dokumentation der Hersteller erreicht man die Recheneinheit im Kopf des Roboters unter der IP Adresse 192.168.123.13. Verbinden lässt sich der Rechner über den Nutzer unitree und dem Passwort 123.

```
# user: unitree, password: 123, root disabled
ssh unitree@192.168.123.<nano-ip(13|14|15)>
```

Laut Hersteller ist auf allen drei Nvidia Chips das Betriebssystem Ubuntu installiert, welches auf Debian basiert, aber einige nützliche Funktionen über die Basis von Debian hinaus mitbringt. So auch den Befehl `lshw`, über den sich eine Zusammenfassung der auf dem System verwendeten Hardware ausgeben lässt.

```
unitree@unitree-desktop:~$ sudo lshw -short
[...] Class          Description
[...] =====
[...] system          NVIDIA Jetson Nano Developer Kit
[...] memory          3962MiB System memory
[...] bridge          NVIDIA Corporation
[...] multimedia      USB2.0 Camera RGB
[...] multimedia      USB2.0 Camera RGB
[...] generic          CP2102N USB to UART Bridge
    ↳ Controller
[...] multimedia      USB Audio Device
```

Erkennbar ist über die gekürzte Ausgabe, dass im Kopf des Go1 ein *NVIDIA Jetson Nano* mit 4 GB Arbeitsspeicher verbaut ist. Zudem sind per USB vier externe Geräte angeschlossen, ein Lautsprecher im Rücken des Kopfes, ein Bridge-Controller zur Steuerung der beiden LED-Bänder und zwei Kameras. Die nach vorne gerichtete Kamera ist unter `/dev/video1` gemountet, die im Kopf nach unten gerichtete Kamera unter `/dev/video0`. Unter den Mount-points der Kameras können diese ausgelesen und als Quelle verwendet werden.

Ein Blick auf die Dateisysteme zeigt im Gegensatz zum selben Befehl auf dem Raspberry Pi lediglich die root-Partition, ein weiteres Inspizieren zeigt dann jedoch ebenfalls die boot-Partition auf der SD-Karte. Die Prozessorvariante in `/proc/cpuinfo` gibt ARMv8 Processor rev 1 (v8l) aus.

```
unitree@unitree-desktop:~$ df -Hx tmpfs -x
    ↪ devtmpfs
Filesystem      Size  Used Avail Use% Mount
/dev/mmcblk0p1  15G   12G   2.5G  83% /

unitree@unitree-desktop:~$ sudo lsblk
NAME            FSTYPE      SIZE MOUNTPOINT
mmcblk0                  14.7G
-> mmcblk0p1    ext4         14G /
mmcblk0boot0                4M
mmcblk0boot1                4M
```

Die genaue Version des Betriebssystems lässt sich analog zum Vorgehen im Raspberry Pi ermitteln:

```
unitree@unitree-desktop:~$ grep PRETTY_NAME /etc/os-release
PRETTY_NAME="Ubuntu 18.04.5 LTS"
unitree@unitree-desktop:~$ uname -r
4.9.201-tegra
```

Zusammenfassend lassen sich die Kerndaten des Nvidia Jetson Nanos im Kopf des Roboters wie in Tabelle 2 dargestellt:

Beschreibung des Home Ordners

Nvidia Jetson Nano Rumpf

Modell	NVIDIA Jetson Nano Developer Kit
Prozessor	ARMv8 Processor rev 1 (v8l)
RAM	3962 MiB (4 GB) Arbeitsspeicher
Speicher	16 GB Festplattenspeicher über eine SD-Karte
OS	Ubuntu 18.04.5 LTS
Kernel	4.9.201-tegra

Tabelle 2: Kenndaten des Nvidia Jetson Nano im Kopf des Roboters

Der Nano im Rumpf des Roboters ist dem Nano im Kopf des Roboters gegenüber bis auf die angeschlossenen Geräte identisch. Die Ausgaben für das Betriebssystem in `/etc/os-release`, der Kernel-Version aus `uname -r` und der Informationen zur SD-Karte aus `df -Hx tmpfs -xdevtmpfs` stimmen bei beiden Geräten überein. Die Unterschiede in der verbundenen Hardware geht aus folgender Ausgabe hervor:

```
unitree@unitree-desktop:~$ sudo lshw -short
[...] Class      Description
[...] =====
[...] system      NVIDIA Jetson Nano Developer Kit
[...] memory      3964MiB System memory
[...] bridge      NVIDIA Corporation
[...] multimedia  USB2.0 Camera RGB
[...] multimedia  USB2.0 Camera RGB
```

Ähnlich zum Nano im Kopf des Go1 sind zwei Kameras verbaut, eine Kamera links im Rumpf von hinten betrachtet unter dem Mounting-Point `/dev/video1` und eine Kamera rechts im Rumpf unter `/dev/video0`. Als Übersicht zu den Kerndaten des Nanos im Rumpf des Roboters kann die Übersicht 2 verwendet werden.

Inhalte Ordner

Nvidia Jetson Xavier NX

Die mit Abstand

```
unitree@nx:~$ sudo lshw -short
[sudo] password for unitree:
[...] Class          Description
[...] =====
[...] system          NVIDIA Jetson Xavier NX
    ↳ Developer Kit
[...] memory          7773MiB System memory
[...] bridge          NVIDIA Corporation
[...] multimedia      USB2.0 Camera RGB
```

3.2.3 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*).

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 10 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 10 zu erkennen ist, sind alle fünf

was für
switch

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

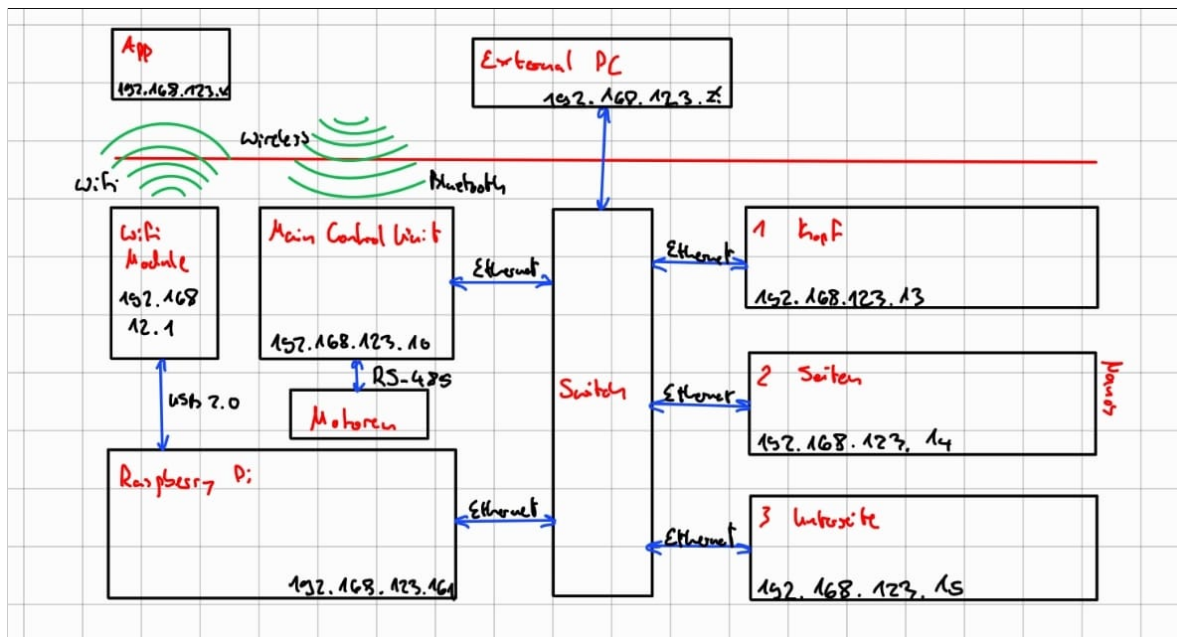


Abbildung 10: Überblick über Netzwerkkonfiguration

Alle geschichteten Komponenten des Netzwerks sind im 192.168.123.0/24-Netzwerk registriert. Dabei ist die Verteilung der IP-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

Überblick
Quelle
aus An-
leitung

was ist
gate-
way?
nötig?

Dem Endgerät, das am externen Ethernet-Port an der Oberseite des Roboters angesteckt werden kann, muss eine statische IP-Adresse im Bereich 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 3.2.2.

3.3 Limitierungen

3.3.1 Rechenleistung

3.3.2 Physische Limitierungen

Throttling!

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 Inbetriebnahme

4.2 Vorgehensweise

4.3 Funktionen

4.3.1 Fernsteuerung

4.3.2 Lokales Netzwerk

4.3.3 Monitoring

4.3.4 Audio Interfaces

4.3.5 LED

4.3.6 Video Streaming

4.3.7 Sensorik

Ultraschall testen

4.3.8 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 Blede 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] *Development and use of Go1 binocular fisheye camera*. Unitree Robotics.
- [6] *Development and use of Go1 ultrasonic module*. Unitree Robotics.
- [7] Boston Dynamics. *Legacy Robots*. URL: <https://bostondynamics.com/legacy/> (besucht am 08.08.2023).
- [8] Boston Dynamics. „Robotics’ Role in Public Safety. How robots like Boston Dynamics’ Spot are keeping people safe.“ In: (2023).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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>.
- [12] Devan Joseph. „MIT reveals how its military-funded Cheetah robot can now jump over obstacles on its own“. In: *Business Insider* (3. Juni 2015).
- [13] 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.
- [14] 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).
- [15] VDI-Gesellschaft Produktionstechnik. *VDI 2860/ Montage- und Handhabungstechnik. Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbol*. Beuth Verlag, 1990.
- [16] Marc Raibert u. a. *BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot*. Boston Dynamics, 8. Apr. 2008.

- [17] Unitree Robotics. *GO-M8010-6 Motor - Unitree Robotics*. URL: <https://shop.unitree.com/products/go1-motor> (besucht am 07.07.2023).
- [18] 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).