|  |
| --- |
| Navigation des mobilen Roboters Sphero  STUDIENARBEIT  für die Prüfung zum  Bachelor of Engineering  des Studienganges Informationstechnik  an der  Dualen Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe  von  Irtaza Syed  Abgabedatum  Matrikelnummer 6519774  Kurs TINF12B3  Ausbildungsfirma SEW-Eurodrive GmbH & Co. KG, Bruchsal  Betreuer Prof. H.-J. Haubner |

Erklärung

gemäß § 5 (2) der „Studien- und Prüfungsordnung DHBW Technik“ vom 18. Mai 2009.

Ich habe die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet.

Ort, Datum Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 3

Abbildungverzeichnis 4

Tabellenverzeichnis 4

Abkürzungsverzeichnis 4

1. Einleitung 5

1.1 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit 5

1.2 Geplantes Vorgehen 5

2. Robotik 6

2.1 Klassifikation von Robotern 6

2.1.1 Industrieroboter 6

2.1.2 Serviceroboter 6

2.1.3 Humanoider Roboter 7

2.1.4 Mobile Roboter 7

3. Sphero 14

3.1 Hardware 14

3.2 API/Software/Firmware 15

4. Android Developer Tools 17

4.1 Sphero-Android-SDK 17

5. Entwurf und Implementierung 18

6. Ergebnis 19

7. Fazit 19

Literaturverzeichnis 20

Anhang 21

Abbildungverzeichnis

Abb. 1: Industrieroboter beim Schweißarbeiten an einer Autokarosserie (KUKA AG: Industrieroboter (2005)) 7

Abb. 2: Autonomer Saugroboter (iRobot Roomba 581) 8

Abb. 3: Humanoider Roboter Nao (Aldebaran Robotics) 8

Abb. 4: Mobiler Roboter: Mars-Rover Curiosity (NASA) 9

Abb. 5: Kontrollplan eines mobilen Roboters 10

Abb. 6: Arrangement of the legs of various animals 11

Abb. 7: The four basic wheel types 12

Tabellenverzeichnis

**Es konnten keine Einträge für ein Abbildungsverzeichnis gefunden werden.**  
Wählen Sie im Dokument die Wörter aus, die in das Inhaltsverzeichnis eingeschlossen werden sollen, und klicken Sie dann auf der Registerkarte "Start" unter "Formatvorlagen" auf ein Überschriftenformat. Wiederholen Sie dies für alle einzuschließenden Überschriften, und fügen Sie das Inhaltsverzeichnis dann in das Dokument ein. Zum manuellen Erstellen eines Inhaltsverzeichnisses zeigen Sie auf der Registerkarte "Dokumentelemente" unter "Inhaltsverzeichnis" auf eine Formatvorlage, und klicken Sie dann auf die Schaltfläche mit dem Pfeil nach unten. Klicken Sie unter "Manuelles Inhaltsverzeichnis" auf eine der Formatierungen, und geben Sie die Einträge dann manuell ein.

Abkürzungsverzeichnis

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers,  
Definitionen von Normen und Standards mit Abkürzung IEEE

WLAN Wireless Local Area Network

FCC Federal Communications Commission

# Einleitung

Automaten sind bereits seit der Antike bekannt. Schon damals wurde mit mechanischen Vorrichtungen experimentiert und Pläne für Automaten entwickelt, die heute noch eine wichtige Bedeutung in der modernen Robotik haben. Diese Arbeit befasst sich mit einigen wichtigen Aspekten der modernen Robotik.

## Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

Sphero ist ein kugelförmiger Roboter von der Firma Orbotix, der mit Android und iOS Geräten über Bluetooth gesteuert wird. Orbotix hat mehrere SDKs für verschiedene Plattformen für Sphero bereitgestellt, mit denen Entwickler den Roboter selbst programmieren können.

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Android App entwickelt werden, die die Navigation des Roboters Sphero ermöglicht. Des Weiteren soll die App mithilfe von Sphero eine zweidimensionale Umrisskarte von einer begrenzten Fläche erstellen und auf dem Bildschirm des verwendeten Geräts (Smartphone/Tablet) anzeigen.

## Geplantes Vorgehen

Das geplante Vorgehen für die Projektarbeit ist wie folgt:

* Einarbeitung in Robotik
* Einarbeitung Sphero (Hardware, Software)
* Entwicklungsumgebung Eclipse, Android SDK und Spheros eigene SDK kennenlernen.
* Beispiel-Apps entwickeln und analysieren.
* Android App zur Navigation des Roboters Sphero implementieren.
* Funktion zur Kartenerstellung und Visualisierung implementieren

# Robotik

Robotik ist eine wissenschaftliche Disziplin, die sich mit der Realisierung und Anwendung von Robotersystemen beschäftigt. In diesem Kapitel werden verschiedene Robotersysteme und einige wichtige Grundlagen für die Entwicklung eines Roboters vorgestellt.

## Roboter

„Roboter sind sensomotorische Maschinen zur Erweiterung der menschlichen Handlungsfähigkeit. Sie bestehen aus mechatronischen Komponenten, Sensoren und rechnerbasierten Kontroll- und Steuerelementen. Die Komplexität eines Roboters unterscheidet sich deutlich von anderen Maschinen durch die größere Anzahl von Freiheitsgraden und die Vielfalt und den Umfang seiner Verhaltensformen.” [[1]](#footnote-1)

Aus diesen Definitionen, kann zusammenfassend ein Roboter folgendermaßen beschrieben werden:

Ein Roboter

* ist eine Maschine bzw. ein Automat, der sich bewegen kann.
* ist programmier- und steuerbar.
* wird für Aufgaben in einer bestimmten Umgebung konstruiert.
* hebt sich durch seine Komplexität von gewöhnlichen Maschinen ab.
* dient dazu, mit seinen Fähigkeiten Probleme des Menschen zu lösen.

## Klassifikation von Robotern[[2]](#footnote-2)

### Industrieroboter

Industrieroboter sind programmierbare Maschinen, die zur Handhabung, Montage und Bearbeitung von Werkstücken dienen. Sie werden meist mit Werkzeugen ausgestattet und für bestimmte Einsatzgebiete in der Industrie festgelegt.

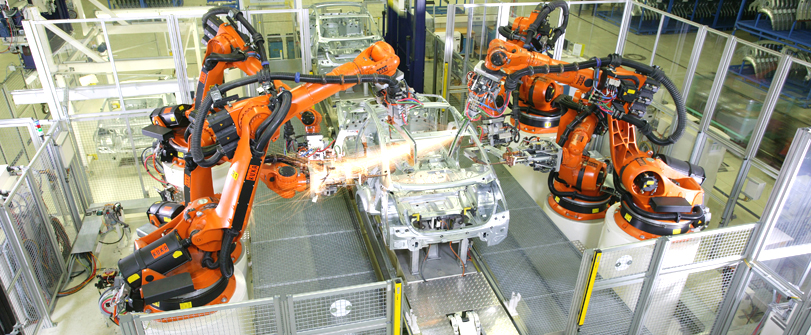


Abb. 1: Industrieroboter beim Schweißarbeiten an einer Autokarosserie (KUKA AG [5])

Die Industrieroboter werden nach Art und Anordnung der Bewegungsachsen unterteilt.

### Serviceroboter

Serviceroboter erbringen Dienstleistungen für den Menschen. Sie sind mit Sensoren zur Erfassung der Umwelt und mit Navigationseinrichtungen ausgestattet, damit sie sich autonom in unstrukturierter Umgebung bewegen können. Serviceroboter werden an verschiedenen Anwendungsbereichen (wie in der Landwirtschaft, Medizin, Reinigung usw.) eingesetzt. Für den privaten Bereich werden auch immer häufiger kostengünstige Serviceroboter angeboten (z.B. für Rasenmähen, Staubsaugen, Transport im Haushalt usw.).



Abb. 2: Autonomer Saugroboter (iRobot Roomba 581)

### Humanoider Roboter

Humanoide Roboter sind dem Menschen nachempfunden. Sie haben vergleichbare kognitive, sensorische und motorische Fähigkeiten. Damit sollen diese mit dem Menschen direkt kommunizieren und interagieren können. Humanoide Roboter sind noch Gegenstand der Forschung. Sie sollen jedoch in einigen Jahren Marktreife erlangen. Zurzeit sind einige Roboter (siehe Abb. 3) bereits in der Lage bestimmte Tätigkeiten aus dem Alltag der Menschen durchführen zu können, wie z.B. Laufen, Tanzen, Musikinstrumente spielen, Lasten tragen usw.

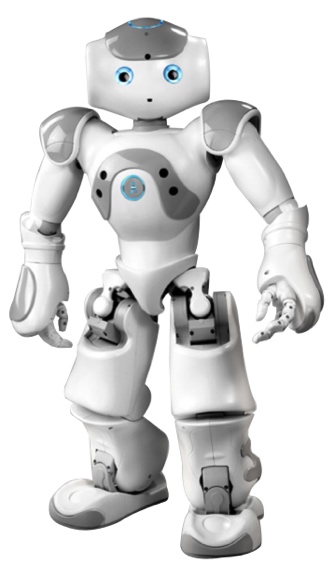


Abb. 3: Humanoider Roboter Nao (Aldebaran Robotics)

### Mobile Roboter

Mobile Roboter können sich frei in einer bestimmten Umgebung bewegen. Sie müssen mit Sensoren ausgestattet sein, die ihnen das Erfassen und Verarbeiten der Umgebung ermöglichen. Im Abb. 4 ist der mobile Roboter Mars-Rover Curiosity zu sehen. Der Roboter ist in der Lage sich auf unebenem Terrain zu bewegen und wird eingesetzt, um den Planeten Mars zu erforschen.



Abb. 4: Mobiler Roboter: Mars-Rover Curiosity (NASA)

Mobile Roboter unterscheiden sich stark in Konstruktion und Aufbau durch ihre unterschiedlichen Einsatzgebiete. So sind z.B. Serviceroboter auch mobile Roboter, da diese die Eigenschaften eines mobilen Roboters erfüllen. Eine weitere mobile Roboterart, ist der Spielzeugroboter. Spielzeugroboter sind Kleinroboter, deren Einsatzgebiet im nichtkommerziellen Hobby- und Spielbereich liegt. Ein Beispiel für einen Spielzeugroboter, ist der für diese Studienarbeit verwendete Kleinroboter Sphero. Im Abschnitt 3 wird Sphero genauer vorgestellt. Vorerst müssen jedoch einige wichtige Aspekte der Entwicklung eines mobilen Roboters verstanden werden:

Das Diagramm im Abb. 5 zeigt den Kontrollplan eines mobilen Roboters. Der mobile Roboter erfasst als erstes die Daten von seiner Umgebung mit Sensoren, mit dem der Roboter ausgestattet ist. Die Daten werden verarbeitet und für die nächsten Schritte genutzt. Der Roboter könnte z.B. aus den erfassten Daten seine Position feststellen und eine sichere Bahn, ohne Hindernisse planen. Dies geschieht in der Lokalisierungsphase. Nachdem der Roboter die Daten verarbeitet hat, kann er die Bewegung ausführen und die geplante Bahn fahren.

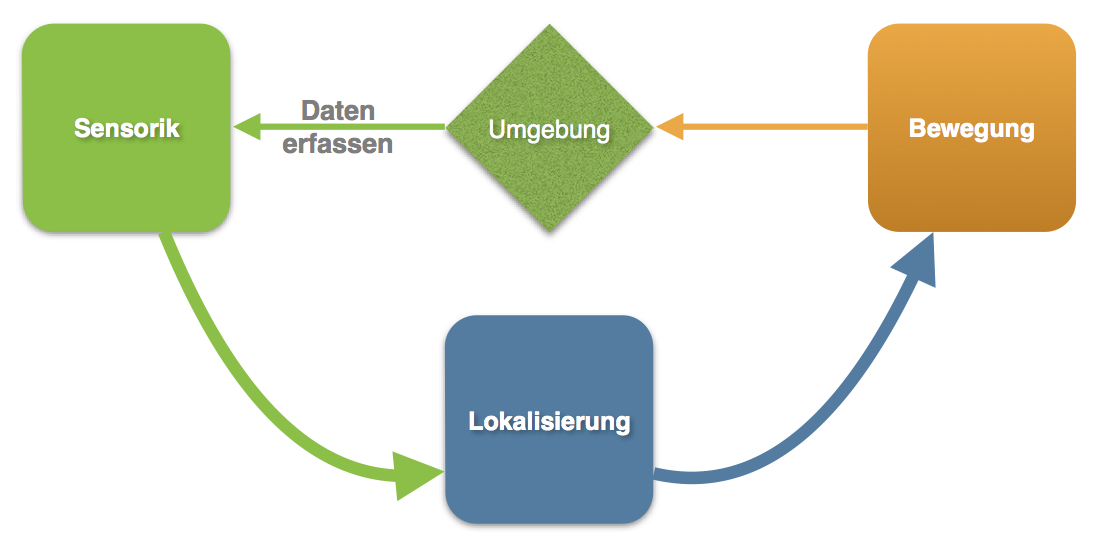


Abb. 5: Kontrollplan eines mobilen Roboters

Im Folgenden werden die im Kontrollplan dargestellten Schritte (Abb. 5) genauer erläutert:

Bewegung (engl. Locomotion):

Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung eines mobilen Roboters ist die Wahl einer Bewegungsart. Es gibt mehrere unterschiedliche Bewegungsarten die in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden:

* **Laufen:** Das Bewegen mit Hilfe von Beinen (engl. **legged mobile robot**).
* **Rollen:** Das Bewegen mit Hilfe von Rädern (engl. **wheeled mobile robot**).

Ein **legged mobile robot** hat i.d.R. 2 bis 6 Beine. Roboter mit nur einem Bein sind sehr instabil und das statische Gehen ist unmöglich. Um statisches Gehen zu ermöglichen, muss ein Roboter mindestens 6 Beine haben. Dies kann in der Natur festgestellt werden:

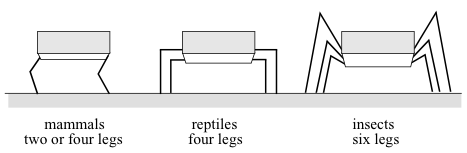


Abb. 6: Arrangement of the legs of various animals[[3]](#footnote-3)

Im Abb. 6 ist die Anordnung der Beine von drei Tierarten (Säugetiere, Reptilien und Insekten) dargestellt.

Insekten und Spinnen können bereits nach der Geburt laufen. Für sie ist das balancieren beim laufen auf sechs Beinen (bzw. acht Beine bei Spinnen) relativ einfach. Neugeborene Säugetiere mit vier Beinen können nach einigen Versuchen zwar auf vier Beinen stehen, jedoch brauchen diese etwas Zeit, um statisch Gehen zu können. Für Säuglinge mit zwei Beinen ist bereits das Stehen eine Herausforderung. Kleinkinder zum Beispiel, brauchen mehrere Monate, um das Stehen und Gehen zu erlernen, da unsere Beine mit zwei Berührungspunkten zum Boden eine sehr geringe Stabilität, im Gegensatz zu vier oder sechs Beinen bieten.

Sequence of list and release und formel dazuschreiben???

Das Bewegen mit Rädern ist der am meisten verwendete Bewegungsmechanismus bei mobilen Robotern. Ein **wheeled mobile robot** ist Effizient und die Realisierung dieses Bewegungsmechanismus ist relativ einfach. Hierbei ist die Balance nicht mehr das entscheidende Kriterium, da alle Räder, zu jedem Zeitpunkt Kontakt zum Boden haben. Stattdessen sind die Bedienung, die Reibung und die Stabilität die wichtigeren Faktoren bei der Entwicklung eines wheeled mobile robots. Dabei wird untersucht, ob die Räder des Roboters das gewünschte Terrain befahren können und eine suffiziente Bedienung der Geschwindigkeit des Roboters bieten.

Es gibt vier Kategorien von Rädern für mobile Roboter. Diese sind im Abb. 7 dargestellt.

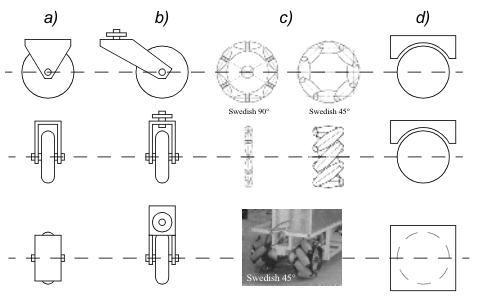


Abb. 7: The four basic wheel types[[4]](#footnote-4)

1. Standard-Rad (engl. standard wheel): zwei Freiheitsgrade[[5]](#footnote-5); Rotation um die Radachse und um die Lenkachse.
2. **Castor-Rad (engl. castor wheel):** zwei Freiheitsgrade; Rotation um die vertikale Radachse und um die Lenkachse.
3. **Mecanum-Rad (engl. swedish wheel):** drei Freiheitsgrade; Rotation um die Radachse; Rotation der einzelnen Rollen und um die Lenkachse.
4. **Ball oder Kugelrad (engl. spherical wheel):** Rotation des Kugels um 360°, in jede Richtung möglich. Technische Realisierung sehr aufwendig.

Das Castor-Rad, Mecanum-Rad und das Kugelrad sind „omnidirektionale“ Räder. Omnidirektionale Räder haben die Eigenschaft zu jedem Zeitpunkt, in jede Richtung (*x, y*) zu fahren und jegliche Rotation auszuführen. Des Weiteren werden Roboter mit omnidirektionalen Rädern als „holonome“ Roboter bezeichnet. Ein Roboter ist holonom wenn er zu jedem Zeitpunkt jeden verfügbaren Freiheitsgrad nutzen kann.

Anders als beim legged mobile robots können wheeled mobile robots bereits mit zwei Rädern eine statische Stabilität erreichen. Jedoch muss der Massenmittelpunkt des Roboters (mit zwei Rädern) unterhalb der Radachse liegen. Läge der Massenmittelpunkt zu hoch, würde der Roboter umkippen. Deshalb erfordert die statische Stabilität mindestens drei Räder[[6]](#footnote-6).

Sensorik (engl. Perception):

Ein Sensor (lat. Sensus, dt. der Sinn) ist ein technisches Bauteil, das gemessene physikalische oder chemische Eigenschaften (z.B. Temperatur, Druck oder Entfernung) erfassen und in ein geeignetes elektrisches Signal umformen kann.

Mobile Roboter besitzen Sensoren, um Informationen aus der Umgebung zu erfassen und diese für bestimmte Tätigkeiten einzusetzen. Die Sensoren sind die Sinnesorgane des Roboters. Es werden häufig verschiedene Arten von Sensoren für einen Roboter benötigt, um seine Umwelt und seinen inneren Zustand zu überwachen. In der Robotik unterscheidet man zwischen externen und internen Sensoren:

* **Externe Sensoren:** sammeln Informationen über die Umgebung des Roboters (z.B. die Entfernung, Navigation, Hindernisse, Bilder von der Umwelt...)

Externe Sensoren, die oft in der Robotik eingesetzt werden sind zum Beispiel Näherungssensoren zur Ortung von Objekten in einem bestimmten Abstand (z.B. Lichtschranke), Positionssensoren zur Navigation (z.B. GPS), CCD-Kamers[[7]](#footnote-7) zur Bildaufnahme usw.

* **Interne Sensoren:** überwachen den inneren Zustand eines Roboters (z.B. die Position, die Orientierung und die Geschwindigkeit).

Interne Sensoren, die oft in der Robotik eingesetzt werden sind zum Beispiel Gyroskope zur Positionsbestimmung oder Messung von Richtungsänderungen, Beschleunigungssensoren zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Roboters usw.

Lokalisierung (engl. Localisation):

Mithilfe der Lokalisierung ist ein mobiler Roboter in der Lage seine Position festzustellen. Nur auf dieser Grundlage kann der Roboter den Weg zu seiner Zielposition bestimmen. Bei der Lokalisierung wird die Position, bestehend aus den Koordinaten *x* und *y* und die Orientierung *θ* bestimmt*.* Diese Kombination aus Position und Orientierung wird „Pose“ genannt.

Die Aufgabe der Lokalisierung kann in der Robotik in zwei wesentlichen Fällen unterschieden werden[[8]](#footnote-8):

* **Lokale Lokalisierung**

Bei der lokalen Lokalisierung ist die Startposition bzw. die aktuelle Pose des Roboters in seiner Umwelt bekannt. Bei Bewegung des Roboters wird die Pose kontinuierlich aktualisiert. Dafür werden Sensoren eingesetzt, die die Bewegung des Roboters erfassen. In der lokalen Lokalisierung wird häufig die Odometrie-Sensorik zur Bestimmung der Position und der Orientierung eingesetzt. Hierbei wird bei wheeled-mobile-robots die Anzahl der Radumdrehung gemessen, während bei den legged-mobile-robots die Anzahl der Schritte zur Messung der Pose verwendet wird. Ein Sensor, der für die Messungen in der Odometrie-Sensorik verwendet wird, ist z.B. der Inkrementalgeber, der pro Umdrehung eine genau definierte Anzahl von Impulsen ausgibt.

* **Globale Lokalisierung:**

Bei der globalen Lokalisierung ist die aktuelle Pose des Roboters in seiner Umwelt nicht bekannt. Der Roboter bestimmt anhand künstlicher und natürlicher Landmarken seine Position. Künstliche Landmarken die häufig bei der Lokalisierung eingesetzt werden sind z.B. Barcodestreifen, GPS, Lichtquellen, Ampeln usw. Natürliche Landmarken sind Umgebungsmerkmale wie Türöffnungen, Wanddecken, Möbel usw. Ist die Pose bestimmt, kann der Roboter mit der lokalen Lokalisierung fortfahren.

Nachdem der Roboter seine Position, mithilfe der Sensorik lokalisiert hat kann er den Pfad zu seiner Zielposition planen und die Bewegung (wie in Abb. 5 dargestellt) ausführen.

# Sphero

Sphero ist ein kugelförmiger, mobiler Spielzeugroboter von der Firma Orbotix, der mit einem Android- oder iOS-Gerät über Bluetooth verbunden werden kann. Es sind mehrere Apps und Spiele vorhanden, mit denen Sphero gesteuert werden kann.



Abb. 8: Sphero und die Firmen eigene Controller-App

## Hardware

Um den Roboter herum ist eine harte Plastikschale, die ihm seine Wasser- und Stoßfestigkeit verleiht. Im Inneren befindet sich die gesamte Elektronik des Roboters. Im Abb. 8 ist Spheros Hardware dargestellt. Die wichtigsten Komponenten sind mit Nummern [1-6] markiert:

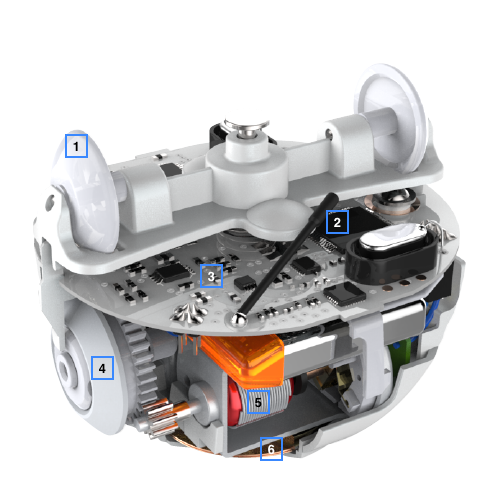


Abb. 9: Sphero Hardware

1. Stützräder auf beiden Seiten
2. Bluetooth Modul: dient zur Verbindung des Roboters mit Android- und iOS-Geräten.
3. Platine mit elektronischen Bauteilen, z.B.: Gyroskop zur Messung von Richtungsänderungen, Beschleunigungssensor zur Bestimmung der Geschwindigkeit sowie Kollisionserkennung, RGB-LED, 75 MHz Prozessor usw.
4. Elektrisch angetriebene Räder auf beiden Seiten
5. Motor, der die Räder (unten s. Nr. 4.) antreibt.
6. Induktionsspule zum kabellosen aufladen (350 mAH LiPo Batterien)

## Software

### Sphero API und Firmware

Die Programmierschnittstelle (engl. API)[[9]](#footnote-9) von Sphero stellt über die Hardware mehrere Funktionen zur Verfügung, die mit einer App auf einem Steuergerät (z.B. Android-Gerät) genutzt werden können. Die Funktionen werden von der Firmware implementiert, die fest mit der Hardware verbunden ist und somit eine Zwischenstellung zwischen der Hardware und der App einnimmt.

**Verbindungsaufbau über Bluetooth:**

Die Verbindung eines Steuergeräts mit Sphero erfolgt über Bluetooth. Nach der Verbindung erfolgt die Datenübertragung zwischen der App und Sphero nach dem Client-Server-Prinzip. Diese Beziehung beschreibt den Informationsfluss zwischen Sphero und der App. Die App sendet als Client Befehle an Sphero, der die Befehle als Server annimmt und nach diesen handelt. Diese Art von Kommunikation wird auch synchrone Kommunikation genannt, bei dem die Kommunikationspartner beim Senden oder Empfangen von Daten immer synchronisieren, also warten, bis die Kommunikation abgeschlossen ist.

**Steuerung der Hardware I/O-Elemente:**

Die I/O-Elemente von Sphero (RGB-LED und der Motor) können über der API und der App gesteuert werden. Um die RGB Farben zu steuern, werden die drei Farbwerte Rot, Grün und Blau an Sphero gesendet. Sphero ändert die Farbe des LEDs entsprechend den eingestellten Farbwerte in der App. Auch die Rotationsgeschwindigkeit des Motors wird über den eingestellten Wert in der App von Spheros Firmware angepasst.

**Kollisionserkennung:**

Spheros Kollisionserkennung ist eine, von der Firmware bereitgestellte Funktion, die bei einem Aufprall einen Impuls auslöst. Die Erkennung basiert auf Schwellenwertparameter, die in der App eingestellt werden können.

Die Kollisionserkennung ermittelt die Kollision anhand der *x*- und *y*-Achse von Sphero.

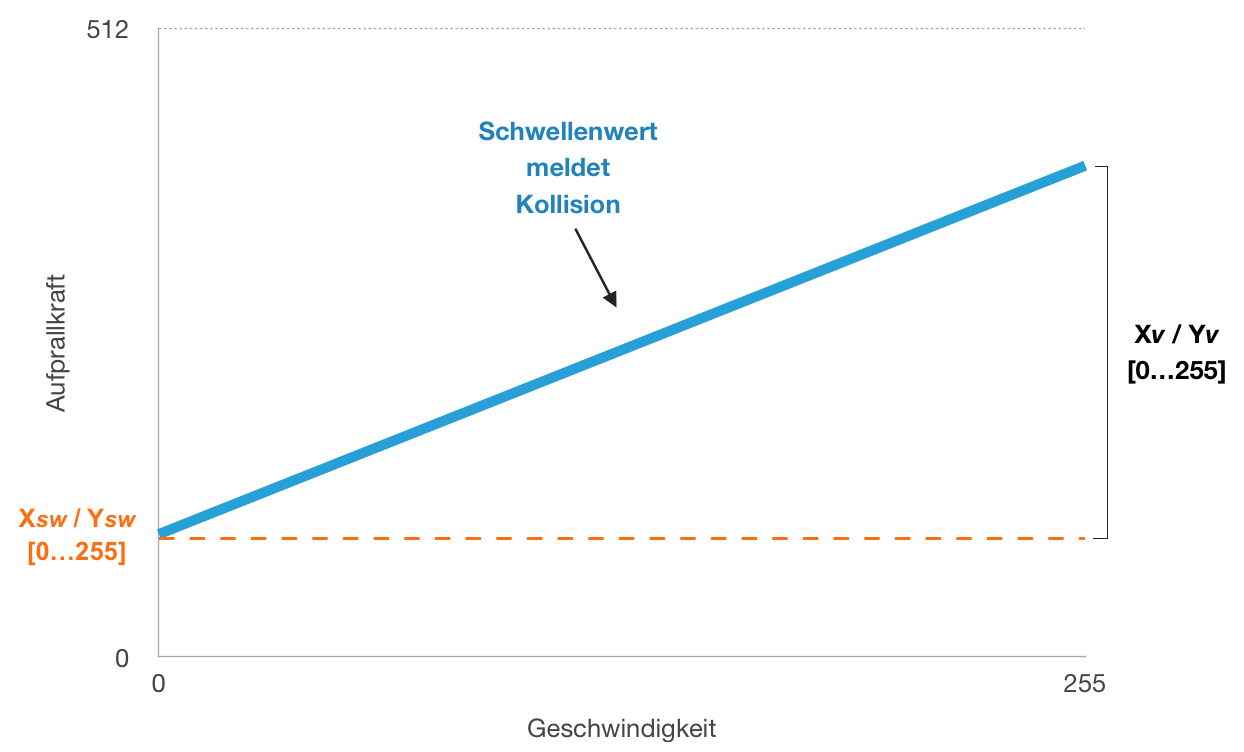


Abb. 10: Kollisionserkennung mittels Schwellenwert

Die Schwellenwerte für die *x*- und *y*-Achse werden unabhängig voneinander kontrolliert. Das Diagramm im Abb. 10 zeigt die bei der Kollisionserkennung beteiligte Parameter. *Xsw* und *Ysw* sind zwei Schwellenwertparameter für die *x*- und *y*-Achse. Sobald eine Aufprallkraft signalisiert wird, die höher ist als der Schwellenwert, wird eine Kollision an die App gemeldet. Die Parameter *Xv* und *Yv* werden mit den Schwellenwertparametern zusammenaddiert.

Diese Geschwindigkeitsparameter beschreiben den Schwellenwert bei der maximalen Geschwindigkeit vor der Kollision.

**Positionsgeber:**

Der Positionsgeber ist, genauso wie die Kollisionserkennung eine von der Firmware bereitgestellte Funktion von Sphero, der die Echtzeit-Position und die Geschwindigkeit von Sphero bereitstellt.

### Sphero und Android SDK

SDK, Sphero Embedded Software?

<http://orbotixinc.github.io/Sphero-Docs/docs/sphero-api/index.html>

collision detection

locator

# Android Developer Tools

## Sphero-Android-SDK

# Entwurf und Implementierung

Experiment-Apps zu Lokalisierung/Positionierung/Kartierung, Kollision, Drive, leds.

Algorithmus. Klassenstruktur.

Ergebnis

# Ergebnis

screenshots

# Fazit

Android Studio, verbesserungsvorschläge

App erweiterung

Literaturverzeichnis

1. Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots, 2004
2. Georg Stark, Robotik mit MATLAB, 2012
3. Thomas Christaller, et al., Robotik, Perspektiven für menschliches Handeln in der zukünftigen Gesellschaft. Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 2001
4. Addison-Wesley, Android Wireless Application Development 2nd, Developer’s Library, 2011
5. Orbotix Inc: Sphero-Docs (2013), <http://orbotixinc.github.io/Sphero-Docs/>, Abruf 10.02.2015
6. Orobotik Inc: Sphero API (2013),

<http://orbotixinc.github.io/Sphero-Docs/docs/sphero-api/index.html>,

Abruf 10.02.2015

1. KUKA AG: Industrieroboter (2005)**,** <http://www.kuka.com/>**,** Abruf 22.02.2015
2. Robotplatform: Introduction to Robots & Robotics, <http://www.robotplatform.com/knowledge/Introduction/Introduction_to_Robots.html>, Abruf 23.03.2015
3. Wikipedia: Lokalisierung (Robotik), <http://de.wikipedia.org/wiki/Lokalisierung_(Robotik>), Abruf 05.03.2015

Anhang

1. Thomas Christaller 2001 [3] [↑](#footnote-ref-1)
2. Vgl. [2], S.17 [↑](#footnote-ref-2)
3. [1], S. 18, Figure 2.5 [↑](#footnote-ref-3)
4. [1], S. 31, Figure 2.19 [↑](#footnote-ref-4)
5. Freiheitsgrad: die Zahl der voneinander unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten eines Systems. [↑](#footnote-ref-5)
6. Vgl. [1], S. 33 Kapitel 2.3.1.2 [↑](#footnote-ref-6)
7. CCD-Sensor (charged coupled device sensor): wandelt Lichtsignale in elektrische Signale um und wird als Bildsensor in optischen Erfassungseinrichtungen wie Digitalkameras, digitale Videokameras usw. eingesetzt [↑](#footnote-ref-7)
8. vgl. [8] [↑](#footnote-ref-8)
9. API (applicatoin programming interface): Ein Programmteil, der Funktionen und Befehle eines Softwaresystems anderen Programmen zur Verfügung stellt. [↑](#footnote-ref-9)