



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

Automatisierte Kleinraumnavigation innerhalb eines autonomen, lokalen Systems

Anforderungen, Möglichkeiten und Limitierungen im Kontext
intelligenter Rasenmäher-Roboter

Verfasser

Gilbert Kotzbek, BSc

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 066 856

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Kartographie und Geoinformation

Betreuerin / Betreuer:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

Danksagung

Das Ende meines Studiums naht. Sowohl sechs Semester Bachelor Geographie, als auch Master Kartographie und Geoinformation liegen nun fast hinter mir. So ist dies ein Anlass Danke jenen Menschen zu sagen, die mich während diesen sechs Jahre begleiteten sowie meine Studienzeit prägten und diese somit unvergesslich machten.

Der größte Dank gebührt meinen Eltern, Isabella und Georg, die mir während des gesamten Studiums immer beiseite gestanden sind und mich mit allen Mitteln und Möglichkeiten unterstützt haben. Ohne ihre Hilfe und ihren Beistand hätte ich mein Studium nicht so erfolgreich absolvieren können. Leider gibt es keine Worte, die meine tiefe Dankbarkeit angemessen ausdrücken könnten. Somit: Vielen, vielen Dank!

An dieser Stelle auch herzlichen Dank an die gesamte Familie, vor allem an meinen Onkel und meine Tante aus Berlin, für das Korrekturlesen mehrerer Arbeiten!

Meiner Lebensgefährtin Theresa danke ich besonders für ihren Beistand, ihre Unterstützung, ihre schier unendliche Geduld und ihr Verständnis. Vielen Dank für Alles!

Einen besonders herzlichen Dank auch an meinem Betreuer, Herrn Dr. Andreas Riedl! Danke für die zahlreichen, konstruktiven Gespräche und Feedbacks, die für die Verfassung dieser Masterarbeit unerlässlich waren. Danke auch für das Vertrauen, mich mehrmals als Tutor zu engagieren und mich in die Hyperglobe Research Group aufzunehmen, wodurch ich wertvolle Erfahrungen sammeln konnte.

Danke an meine Studienkollegen! Danke für unvergessliche Ausflüge, Exkursionen sowie sonstiger Aktivitäten außerhalb der Uni.

Danke an Jakob, mit dem Gruppenarbeiten nie eine Qual waren. Das A-Team bleibt unvergesslich!

Katha, Armin und Illy, meine Jahrgangskollegen von der Kartographie. Vielen Dank für die tolle Zusammenarbeit in diversen Lehrveranstaltungen und Danke für die gemeinsamen Freizeitaktivitäten und Ausflüge.

Aber auch allen anderen Studienkollegen und -kolleginnen, ein herzliches Danke für eine lehrreiche, unvergessliche und vor allem amüsante Studienzeit.

Danke auch an meine Freunde aus dem Studentenheim Donaufeld, die mein Leben außerhalb der Uni prägten und mit mir teilten.

Zu guter Letzt möchte ich meinem schlechten Gewissen danken, das bei aufkommender Faul- und Trägheit mich oftmals überreden konnte, dieses oder jenes noch zu erledigen bzw. besser zu machen!

KURZFASSUNG

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit automatisierter Kleinraumnavigation innerhalb eines autonomen, lokalen Systems, wobei Rasenmäher-Roboter als Untersuchungsobjekte herangezogen werden. Neben einer kurzen Einführung in die Navigation im weiteren Sinne sowie in die Entwicklungsgeschichte von Rasenmäher-Robotern, wurden mit Hilfe einer Expertenbefragung Anforderungen an ein intelligentes Rasenmäher-Robotersystem ermittelt, im Zuge dessen ein Bereichskatalog erstellt wurde. Anschließend wurden unterschiedliche Datenerfassungsmethoden sowie verschiedene Navigationssysteme und -strategien analysiert, um herauszufinden, ob die gegenwärtige Technologie in der Lage ist, die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Im Rahmen einer Gegenüberstellung der Forschungsergebnisse wurde außerdem ein "ideales" Rasenmäher-Robotersystem aufgestellt, wobei Methoden und Komponenten, unter Berücksichtigung des Preis-leistungsverhältnisses, ausgewählt wurden.

Schlüsselwörter: Intelligente Rasenmäher-Roboter; GNSS, dGNSS, RTK-GNSS; Inertiale Messeinheit; Alternative Positionierungstechniken; SLAM (Simultaneous Localization and Mapping); Navigationssysteme; Pfadplanungsstrategien; Statische und dynamische Objekterkennung und -ausweichung

ABSTRACT

The present master thesis deals with automated navigation of small spaces in an autonomous, local system where robotic lawn mowers are the objects of examination. Beside a short introduction to navigation and the evolution of robotic lawn mowers, requirements for intelligent robotic lawn mowers are identified by an expert survey. Therefore a field-related catalogue was created. Different data collection methods and various navigation systems and strategies were analyzed subsequently with the goal to find out if it is possible to fulfill the requirements with current technologies. In the course of a comparison of the research results, an ideal robotic lawn mower system was assorted according to the price-performance ratio of the selected methods and components.

key words: intelligent robotic lawn mowers; GNSS, dGNSS, RTK-GNSS; inertial measurement unit; alternative positioning techniques; SLAM (Simultaneous Localization and Mapping); navigation system; path planning strategies; static and dynamic obstacle detection and avoidance

INHALTSVERZEICHNIS

1	VORWORT	1
2	EINLEITUNG	3
2.1	Forschungsfragen, Zielsetzungen und Methodik	4
2.2	Aufbau der Masterarbeit.....	6
3	EINE EINFÜHRUNG IN DIE NAVIGATION IM WEITEREN SINNE	8
4	DIE ENTWICKLUNGSGESCHICHTE VON RASENMÄHER-ROBOTERN .	12
4.1	Rasenmäher-Roboter innerhalb der Familie der Service-Roboter	12
4.2	Von den ersten Anfängen bis zum Jahr 2000	14
4.3	Kommerzielle Rasenmäher-Roboter von 2000 bis 2010	15
4.4	Kommerzielle Rasenmäher-Roboter: State of the Art.....	16
4.5	Rasenmäher-Roboter im wissenschaftlichen Umfeld	17
5	NAVIGATIONSPROBLEME VON ROBOTERN	21
6	ANFORDERUNGEN AN INTELLIGENTE RASENMÄHER-ROBOTERSYSTEME.....	25
6.1	Umfragedesign.....	25
6.2	Die Umfrageergebnisse im Detail.....	27
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse und Auswertung	47
7	STATE OF THE ART I - DATENERFASSUNGSMETHODEN IM KONTEXT MOBILER, AUTONOMER ROBOTER	52
7.1	Potentielle Datenquellen, deren Erfassungsmethoden und Funktionsweisen sowie Beschränkungen.....	52
7.1.1	Primärdaten von GNSS, dGNSS und RTK GNSS zur absoluten und relativen Positionierung von mobilen Robotern	52

7.1.1.1	Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS): Systemaufbau, Erfassungsmethoden und deren Fehlerquellen	52
7.1.1.2	Differentielles Globales Navigationssatellitensystem (dGNSS).....	60
7.1.1.3	Real Time Kinematic Vermessung (RTK)	61
7.1.2	Sekundärdaten aus vorhandenen analogen/digitalen Karten.....	63
7.1.3	Daten der Inertialen Messeinheit zur relativen Positionierung	64
7.1.4	Alternative Positionierungstechniken	67
7.2	SLAM: Simultaneous Localization and Mapping.....	70
7.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	73
8	STATE OF THE ART II - NAVIGATIONSSYSTEME UND -STRATEGIEN IM KONTEXT MOBILER, AUTONOMER ROBOTER	75
8.1	Alternative Methoden zur Begrenzung der zu mähenden Fläche	76
8.1.1	Grenzziehung mit Hilfe koordinativ bekannter Punkte	76
8.1.2	Optische Linien zur Begrenzung der zu mähenden Fläche	77
8.2	Methoden der Koppelnavigation.....	79
8.3	Pfadplanungsstrategien für Rasenmäher-Roboter	81
8.3.1	Allgemeine Algorithmus-Hierarchie von Pfadplanungsstrategien	81
8.3.2	Vergleich unterschiedlicher Mähmuster und -strategien.....	82
8.3.3	Normalisierung der Ausrichtung zur Leistungssteigerung	84
8.3.4	Mehrstufiger Pfadplanungsalgorithmus.....	85
8.3.5	Implementierung unterschiedlicher Modi und Verhalten	86
8.3.6	Blockaufteilung und Attributierung der Rasenfläche.....	87
8.3.7	Unterteilung und Gewichtung der zu mähenden Fläche.....	88

8.4	Methoden zur Erkennung von statischen/dynamischen Hindernissen und Ausweichstrategien	89
8.4.2	Objekterkennung mit Hilfe von Ultraschall- und Infrarotsensoren.....	93
8.4.3	Objektbestimmung unter Verwendung visueller Systeme	94
8.4.4	Objekterkennung mittels Berührungssensoren.....	95
8.5	Navigation mittels manuell vordefinierten Pfad	96
8.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	98
9	GEGENÜBERSTELLUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE	102
10	ZUSAMMENSTELLUNG EINES IDEALEN INTELLIGENTEN RASENMÄHER-ROBOTERS ZUR AUTOMATISIERTEN KLEINRAUMNAVIGATION	106
10.1	Komponenten eines intelligenten Rasenmäher-Roboters	106
10.2	Konzeption eines intelligenten Rasenmäher-Roboters.....	107
10.3	Beispielhafter Workflow eines intelligenten Rasenmäher-Roboters	109
10.4	Optionales Graphical User Interface	111
11	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	115
	QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS	I
	Verwendete Literatur:.....	I
	Online-Literatur	VI
	Weitere Online Quellen	VIII
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	X
	ANHANG.....	XIII

1 VORWORT

Rasenmähen wird oftmals als unangenehme Arbeit angesehen. Diese allgemeine Aussage ist, soweit dem Autor bekannt, noch keiner wissenschaftlichen Untersuchung unterzogen worden. Dennoch ist diesbezüglich ein bestimmter Grundkonsens in der breiten Bevölkerung zu beobachten. Das Mähen des Rasens ist unvermeidlich mit einer zeitraubenden und anstrengenden Tätigkeit verbunden, die aber auch gefährlich sein kann. Immer wieder berichten Medien über entsprechende Unfälle mit Rasenmähern, bei denen hauptsächlich Verletzungen an Händen und Fingern sowie Zehen vorkommen. Vereinzelt sind aber auch Todesfälle nach Unfällen mit Rasenmähern zu beklagen. In den Vereinigten Staaten von Amerika kommt es jährlich zu rund 80.000, in Deutschland zu rund 7.000 Unfällen in Verbindung mit Rasenmähern (vgl. [URLb-02] bzw. [URLb-03]). Außerdem steigt die Zahl der Allergiker stetig (vgl. [URLb-04]). Für jene Personen, die allergisch auf Gräser reagieren, ist das Rasenmähen besonders unangenehm. Um diese Unannehmlichkeiten aus dem Weg zu gehen und trotzdem einen gepflegten Rasen zu haben gibt es eigentlich nur zwei Möglichkeiten. Die erste Option ist, dass jemand anderer, womöglich gegen Bezahlung, diese Arbeit übernimmt. Bei der zweiten Variante mäht anstelle eines Menschen ein Rasenmäher-Roboter den Rasen. Dies entspricht heute keiner Zukunftsmusik mehr.

Die Geschichte des Rasenmähers ist lang. Sie beginnt bereits im frühen 18. Jahrhundert auf der britischen Insel, als ein zunehmender Wunsch nach schönen und gepflegten Parks aufkam. Für die großflächigen Anlagen waren die zu dieser Zeit üblichen Handsensen, die seit dem Mittelalter bekannt sind, unpraktisch. 1830 wurde das erste Patent für einen Spindelrasenmäher von E. B. BUDDING (1795-1846) eingereicht. Sein Modell ist in Abb. 1 dargestellt.



Abb. 1: Erster Rasenmäher der Welt von E.B. BUDDING, 1830

Quelle: [URLb-15], modifiziert

Rund 70 Jahre später wurde im Jahre 1902 der erste gasbetriebene Motorrasenmäher vorgestellt. Im Laufe des letzten Jahrhunderts kam es zu stetigen Verbesserungen und Erweiterungen. Der Rasenmäher wurde zum Serienprodukt und ist heute so normal wie etwa ein Staubsauger oder Mixer, die sich ebenfalls in jedem Einfamilienhaus finden lassen. Gegen Ende des letzten Jahrhunderts, im Jahr 1995, kam es zu einer revolutionären Weiterentwicklung. Mit dem "Solarmower" des schwedischen Herstellers Husqvarna, dargestellt in Abb. 2, kam der erste Rasenmäher-Roboter auf dem Markt (vgl. [URLb-05]).



Abb. 2: "Solarmower" von Husqvarna, 1995. Der erste Rasenmäher-Roboter auf dem Markt
Quelle: [URLb-13]

Das Funktionsprinzip ist seither im Wesentlichen unverändert geblieben. Der Rasenmäher-Roboter bewegt sich innerhalb einer Fläche, die mit Hilfe von eingegrabenen Induktionsschleifen begrenzt ist und mäht nach einem zufälligen Muster den Rasen. Dies ist in vielen Fällen nicht nur qualitativ unzureichend sondern auch ineffizient. Aus diesem Grund gibt es von vielen universitären Einrichtungen und Forschungsgruppen, aber auch aus der Privatwirtschaft Bestrebungen diese Roboter mit einem intelligenten Navigationssystem auszustatten. Hier besteht auch für die Disziplin der Kartographie und Geoinformation die Möglichkeit einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag innerhalb dieses interdisziplinären Forschungsfeldes zu leisten. Diese Masterarbeit ist daher auch als einer der ersten kartographischen Impulse in diese Richtung anzusehen.

Um den Lesefluss nicht unnötig zu erschweren wird auf eine grundlegende geschlechtsneutrale Formulierung verzichtet. In der vorliegenden Arbeit sind stets beiderlei Geschlechter gemeint. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit wird dennoch darauf geachtet, möglichst geschlechtsneutrale Formulierungen zu verwenden.

2 EINLEITUNG

Die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel "Automatisierte Kleinraumnavigation innerhalb eines autonomen, lokalen Systems - Anforderungen, Möglichkeiten und Limitierungen im Kontext intelligenter Rasenmäher-Roboter" beschäftigt sich mit einem äußerst speziellen und vor allem interdisziplinären Themenkomplex, der bislang kaum von Vertretern der Kartographie aufgegriffen wurde. Vielmehr wird dieser Forschungsbereich von Fachleuten der Geomatik und Ingenieurwissenschaften sowie Robotik eingenommen und maßgeblich geprägt. Dies kann aufgrund der Anzahl wissenschaftlicher Beiträge und Publikationen zu dieser Thematik nachgewiesen werden. Einen perfekt funktionierenden Rasenmäher-Roboter zu bauen ist nicht die Aufgabe bzw. die Intention eines Kartographen. Dieser Beitrag ist auch nicht als Einverleibungsversuch von fremden Forschungsobjekten anderer Wissenschaftsdisziplinen anzusehen. Vielmehr verfolgt diese Masterarbeit das übergeordnete Ziel, einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag innerhalb dieses interdisziplinären Forschungsgebietes zu leisten.

An dieser Stelle muss jedoch festgehalten werden, dass es sich im Rahmen einer Masterarbeit nur um erste Impulse in diese Richtung handeln kann. Diese können jedoch und sollen auch als Ansporn für weitere kartographische Forschungen auf diesem Gebiet angesehen werden.

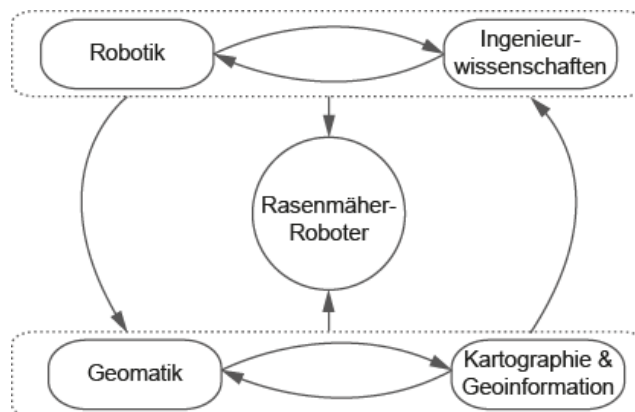


Abb. 3: Die Stellung der Kartographie innerhalb des vorliegenden Forschungsfeldes

Abb. 3 stellt vereinfacht die Stellung der Kartographie und Geoinformation innerhalb des vorliegenden Forschungsfeldes dar. Dabei kristallisieren sich zwei Gruppen heraus: Zwischen der Robotik und den Ingenieurwissenschaften gibt es einen regen Austausch innerhalb dieses Forschungsbereiches. Diese Gruppe ist, bezogen auf die Thematik, sowohl theoretisch als auch praktisch orientiert. Als Gegenstück dazu gibt es ebenfalls große Überschneidungspunkte zwischen der Geomatik und der Kartographie. In Bezug auf Ra-

senmäher-Roboter liefern diese beiden Disziplinen eher theoretische Beiträge, was praktische Umsetzungen nicht kategorisch ausschließen lässt. In Hinblick auf das zentrale Forschungsobjekt ist ein Austausch dieser beiden Gruppen unerlässlich.

Der Fachbereich der Kartographie und Geoinformation ist in der dargestellten Forschungsumgebung vor allem im Themenkomplex der Navigation und darin speziell im Rahmen der Geodatenerfassung und -verwaltung dazu in der Lage, Frage- und Problemstellungen aufzugreifen, diese zu behandeln und die erzielten Ergebnisse in den interdisziplinären Pool zurückfließen zu lassen. Dadurch kann übergeordnet betrachtet ein bedeutender Mehrwert generiert werden.

In den letzten Jahren erfreuten sich Rasenmäher-Roboter steigender Beliebtheit und die Hersteller verzeichneten stetig wachsende Umsatzzahlen (vgl. [HIC-00]). Die Mehrheit der aktuell zum Verkauf stehenden Geräte ist nicht mit einer intelligenten Navigationseinheit ausgestattet. Die Roboter, die mit entsprechenden Sensoren bestückt sind, befinden sich innerhalb eines abgeschotteten Systems, das meist mit Hilfe eingegrabener oder aufgelegter Induktionsschleifen begrenzt ist. Innerhalb dieser unsichtbaren Barrieren mähen die Roboter den Rasen nach einem vordefinierten Algorithmus, meist nach zufälligem Muster, ab. Diese Methode hat sich zwar größtenteils als zuverlässig erwiesen, hat jedoch auch unvermeidliche Nachteile. Zum einen ist die Verlegung dieser Induktionsschleifen sehr zeit- und kostenintensiv. Zum anderen werden aufgrund dieser Mähtechnik unnötig viel Zeit und Energie verschwendet (vgl. [MEL-12] u. [SHI-08]). Mit Hilfe adäquater und präziser Positionierungssysteme können diese Nachteile aufgehoben werden. Dazu ist es jedoch erforderlich ein Echtzeit-Navigationssystem inkl. entsprechender Messmethoden im (Sub-) Zentimeter-Bereich zu integrieren.

Die Forschungsfragen, die der vorliegenden Masterarbeit zugrunde liegen, sowie die dahinterstehende Methodik zu deren Beantwortung und somit zur Erreichung der Zielsetzungen, werden im nächsten Unterkapitel erläutert.

2.1 Forschungsfragen, Zielsetzungen und Methodik

Die Masterarbeit verfolgt das Ziel die nachfolgenden drei Forschungsfragen mit Hilfe unterschiedlicher wissenschaftlicher Methoden und Techniken zu beantworten. Dadurch soll ein kartographischer Beitrag zum interdisziplinären Themenkomplex "Automatisierte Kleinraumnavigation" geleistet werden, der sich nicht unbedingt auf Rasenmäher-Roboter im Speziellen oder Service-Roboter im Allgemeinen beschränken muss.

- Forschungsfrage 1

"Welche Anforderungen, hinsichtlich Funktionalität und Genauigkeit werden an intelligente Rasenmäher-Robotersysteme gestellt?"

Die Beantwortung der ersten Forschungsfrage soll mit einer speziellen Form der klassischen Befragung im Querschnittsdesign mit Hilfe einer Online-Umfrage (E-Survey) durchgeführt werden. Die Teilnehmer wurden dabei bereits im Vorfeld selektiert und gebeten, den Online-Fragebogen auszufüllen (siehe Anhang).

Die Partizipierenden wurden in drei Probandengruppen aufgeteilt. Diese Differenzierung ermöglicht die Generierung von drei unterschiedlichen Sichtweisen und Standpunkten, die in weiterer Folge untersucht werden können. Die erste Gruppe setzt sich aus Personen zusammen, die sich im wissenschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsbereich mit Rasenmäher-Robotern beschäftigen. In erster Linie handelt es sich hier um die Teilnehmer der ION Robotic Lawn Mower Competition ([URLb-01]) aus den letzten Jahren. Weitere Informationen über diesen Wettbewerb sind im Kapitel 4.4 nachzulesen. Die zweite Probandengruppe ist ebenfalls mit der Erforschung und Entwicklung von Rasenmäher-Robotern beschäftigt, jedoch im industriellen Bereich. Diese Gruppe setzt sich im Wesentlichen aus den Fachmitarbeitern der Firma Belrobotics (URLb-06) zusammen, die sich freundlicherweise bereit erklärten, an der Umfrage teilzunehmen. Personen, die mit dem Vertrieb und Verkauf von Rasenmäher-Roboter beruflich tätig sind, stellen die dritte Gruppe dar. Dazu wurden entsprechende Anfragen an Fachhändler und Baumärkte, die Rasenmäher-Roboter im Sortiment aufweisen, gestellt.

Der online abrufbare Fragebogen ist in einer deutschen und englischen Version verfügbar. Er besteht in der Basisversion aus 27 bis 30 Einzelfragen, je nachdem ob bestimmte Gabelungsfragen weitere Fragen öffnen oder nicht. Diese Version steht allen drei Gruppen zur Verfügung. Der dritten Probandengruppe werden zusätzliche Fragen, bezüglich Kundenwünsche, gestellt. Abhängig von den Antworten auf Gabelungsfragen enthält diese Version 30 bis 34 Fragen. Die Zuteilung zu einer Gruppe erfolgt durch die Probanden selbst, indem sie bei der betreffenden Frage ihren Tätigkeitsbereich angeben.

Der Fragebogen setzt sich aus unterschiedlichen Frage- und Antwortformen zusammen. Formal gesehen werden dichotome geschlossene Fragen, Alternativfragen inkl. Rangordnung, aber auch offene Fragen verwendet. Inhaltlich betrachtet werden vor allem Einstellungen und Überzeugungen ermittelt. Die Auswertung des Fragebogens erfolgt mit Hilfe statistischer Analysen gemäß der Methoden der Deskriptiven Statistik.

- Forschungsfrage 2

"Wo liegen die Grenzen bei lokalen, autonomen Navigationssystemen, hinsichtlich geometrischer und zeitlicher Auflösung, im Einsatzbereich von Service-Robotern?"

Die zweite Forschungsfrage soll anhand einer eingehenden Fachliteraturrecherche beantwortet werden. Dabei stehen Service-Roboter im Allgemeinen im Vordergrund, da

unter Umständen auch Techniken von Indoor-Robotern für Rasenmäher-Roboter verwendet werden können.

- Forschungsfrage 3

"Inwiefern ist die gegenwärtige Technologie dazu in der Lage diese Anforderungen, in Bezug auf die erste Forschungsfrage, zu erfüllen?"

Die Ergebnisse der ersten beiden Forschungsfragen bilden die Grundlage für die dritte und letzte Forschungsfrage. Dazu sollen diese vergleichend gegenübergestellt bzw. abgeglichen werden.

Das nächste Unterkapitel liefert Auskunft über den Aufbau der vorliegenden Masterarbeit. Dabei werden die einzelnen Kapitel und deren Inhalte erläutert.

2.2 Aufbau der Masterarbeit

Um einen angemessenen Einstieg in die Thematik zu gewährleisten und ein fundiertes Basiswissen zu generieren, befasst sich Kapitel 3 mit der Navigation im weiteren Sinne. Dies wird anhand bestimmter Definitionen und Begriffsklärungen ermöglicht. Außerdem werden die drei Teilbereiche der Navigation erläutert. Diese sind Lokalisation, Zielbestimmung und Fahrtwegermittlung bzw. Navigation im engeren Sinne.

Anschließend behandelt Kapitel 4 die Entwicklungsgeschichte von Rasenmäher-Robotern, wobei zunächst eine Klassifikation und Abgrenzung innerhalb der Service-Roboter vorgenommen wird. Das Kapitel ist in unterschiedliche Zeitabschnitte gegliedert, um die einzelnen Evolutionsstufen besser darstellen zu können. Es handelt sich dabei jeweils um kommerzielle Rasenmäher-Roboter. Das letzte Subkapitel beschäftigt sich hingegen mit Rasenmäher-Robotern aus dem wissenschaftlichen Umfeld.

Kapitel 5 verschneidet die Inhalte der beiden ersten Kapitel und liefert Informationen über die vorherrschenden Navigationsprobleme von Robotern. Dabei wird im Speziellen Bezug auf die Probleme der Positionsverfolgung und der globalen Lokalisation sowie auf das Kidnapped Robot Problem genommen. Diese können auch als Probleme der Lokalisation bezeichnet werden.

Während die ersten drei Kapiteln des Hauptteils im Wesentlichen zur Generierung eines entsprechenden Basiswissens über den bearbeiteten Themenbereich dienen, nehmen die darauffolgenden Kapitel direkt Bezug auf die Forschungsfragen. Zunächst werden in Kapitel 6 die ausgewerteten Ergebnisse des Empirieteils zur ersten Forschungsfrage zusammenfassend präsentiert. Anhand der Ergebnisse der Fragebogenauswertung wird außerdem der Versuch unternommen, einen Bereichskatalog für einen idealen Rasenmäher-Roboter zu erstellen.

Die folgenden zwei Kapitel beziehen sich auf die zweite Forschungsfrage. In Kapitel 7

werden die aktuellen Möglichkeiten und Grenzen von Datenerfassungsmethoden im Kontext mobiler, autonomer Roboter aufgezeigt. Dabei kommt es zu einer Unterteilung in mehrere Blöcke, die wiederum eigene Subkapitel widerspiegeln. Zu Beginn werden Primärdaten von Globalen Navigation Satellitensysteme und deren Modifizierungen genauer unter die Lupe genommen. Anschließend werden Sekundärdaten, die von großmaßstäbigen Karten abgeleitet werden können untersucht. Der nächste Block beschäftigt sich mit Daten von inertialen Messeinheiten (en. Inertial Measurement Unit, IMU), die zur Navigation verwendet werden können. Der Themenbereich endet mit einer Auswahl an Alternativmethoden zur Primärdatenerfassung. Im Anschluss daran wird kurz die Dualität der Kartierung und Lokalisierung diskutiert, die vor allem bei SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) Methoden zum Vorschein kommt. Diese stellen den Inhalt des letzten Subkapitels von Kapitel 7 dar.

Kapitel 8 beschäftigt sich mit unterschiedlichen Navigationssystemen und -strategien im Kontext mobiler, autonomer Roboter. Im Zuge dessen werden zunächst verschiedene Methoden zur Begrenzung der zu mähenden Fläche aufgezeigt. In den folgenden Subkapiteln werden sowohl Pfadplanungsstrategien, als auch Ansätze, die auf dem Prinzip der Koppelnavigation basieren, untersucht. Darauf folgt eine Beschreibung der Methoden zur Erkennung von statischen und dynamischen Hindernissen, die auf unterschiedliche Sensortechnologien basieren können. Außerdem werden potentielle Ausweichstrategien erläutert und diskutiert. Im letzten Teil dieses Kapitels werden Navigationssysteme für Rasenmäher-Roboter analysiert, die vordefinierte Pfade verwenden.

Die Gegenüberstellung und der Abgleich der Forschungsergebnisse, resultierend aus der Bearbeitung der ersten und zweiten Forschungsfrage, ist Thema von Kapitel 9. Im Anschluss daran wird in Kapitel 10 versucht, ein "ideales" intelligentes Rasenmäher-Robotersystem zusammenzustellen und zu konzipieren. Dies beinhaltet unter anderem die Auswahl verschiedener Komponenten unter Berücksichtigung des Preis Leistungsverhältnisses. Außerdem soll eine graphische Konzeption das zusammengestellte System besser veranschaulichen und ein typischer Workflow vom Erwerb bis zum Dauerbetrieb beschrieben werden. Zur Steuerung und Überwachung des Rasenmäher-Roboters soll des Weiteren eine graphische Benutzeroberfläche, in Form eines Mock-up Graphical User Interface (GUI), entworfen werden.

Eine prägnante Zusammenfassung, in der die wichtigsten Erkenntnisse noch einmal aufgerollt werden, bildet zusammen mit einer kurzen Abschlussbetrachtung, inkl. Ausblick den thematischen Abschluss dieser Masterarbeit, die mit einem Quellen- und Literaturverzeichnis sowie einem Abbildungsverzeichnis endet, damit die Überprüfbarkeit der verwendeten Quellen gewährleistet werden kann.

3 EINE EINFÜHRUNG IN DIE NAVIGATION IM WEITEREN SINNE

Der Begriff "Navigation" wird heutzutage vielseitig verwendet, was auch zur Diffusion dieses Ausdruckes führen kann. Was eigentlich genau dahinter steckt wird in diesem Kapitel erläutert, denn Navigation ist mehr als "Von A nach B zu kommen". W. BÖHM versteht darunter *"... jede Maßnahme (Beobachtung, Messung und Auswertungsmethode), mit welcher der geographische Ort und/oder die Bewegung eines Fahrzeuges ermittelt bzw. ein bestimmtes Fahrtziel, gegebenenfalls auf einem festgelegten Weg, erreicht wird."* ([BÖH-03], S. 6). H. SALER und J. UHL fügen ergänzend hinzu, dass Navigation *"... eine anspruchsvolle menschliche Aktivität..."* ist, *"...für die umfangreiche Informationen bzw. Geodaten zur Verfügung stehen müssen."* ([SAL-12], S. 115) Heutzutage wird, in der zunehmend technologiedominierenden Welt, die von H. SALER und J. UHL erwähnte *"menschliche Aktivität"*, zumindest bezogen auf den Endnutzer, reduziert auf den Auswertungsprozess, da Navigationssysteme häufig die eigentliche Arbeit erledigen. Da diese Systeme wiederum von Menschen konstruiert und programmiert werden, sind Fehler nicht auszuschließen, weswegen ein fehlerfreies Navigationssystem in der Literatur auch mit einem künstlerischen Charakter versehen wird, wie folgendes Zitat belegt: *"A navigation system is a method of determining the position and course of a vehicle through the use of geometric description and navigation technique [...], also known as the art and the science of navigation. A navigation technique is defined as a method of determining a vehicles position and velocity."* ([URLa-19], S.11 nach P. D. GROVES)

In Abhängigkeit vom Ort, von dem der Navigationsprozess ausgeht, lassen sich im Wesentlichen drei Kategorien differenzieren - Navigation zu Luft, Land und Wasser. Eine Sonderform stellt die Astronomische Navigation dar, die vor allem am Land und zu Wasser zur Anwendung kommt. Zusätzlich können verschiedene Methoden unterschieden werden. So z.B. Methoden der Terrestrischen Navigation mit Hilfe von Landmarken, Sichtnavigation mittels Kartenabgleich, Satelliten-, Rader- oder Funknavigation sowie Koppel- und Trägheitsnavigation, um nur einige zu nennen. Diese Verfahren können mehreren Kategorien zugeordnet werden. Ihr gemeinsame Nenner liegt in den drei grundlegenden Fragen, die aus der Definition von W. BÖHM herauszulesen sind: "Wo bin ich?", "Wo will ich hin?" und "Wie komme ich dorthin?" (vgl. [SOL-12]). Eine auf den zweidimensionalen Raum vereinfachte Illustration der drei Teilbereiche der Navigation im weiteren Sinne ist in Abb. 4 dargestellt.

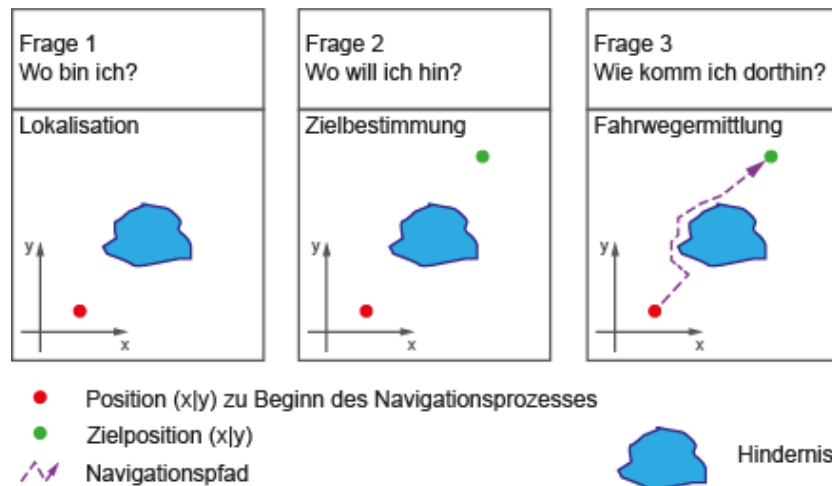


Abb. 4: Teilbereiche der Navigation. Vereinfachte Darstellung für den 2 dimensionalen Raum

Diese Fragestellungen können zugleich als die drei Problembereiche der Navigation im weiteren Sinne angesehen werden - "Lokalisation", "Zielbestimmung" und "Fahrwegermittlung" bzw. "Navigation im engeren Sinne". In der Robotik werden anstelle der beiden letztgenannten Bezeichnungen oft die Begriffe "place recognition" und "path planning" verwendet (vgl. ebd.).

- Lokalisation

Die Lokalisation ist das erste Problem und somit Ausgangspunkt jedes Navigationsprozesses. Darunter kann das (Wieder-)Finden der eigenen Position verstanden werden (vgl. ebd.). Synonym werden oftmals und zum Teil fälschlicherweise die Begriffe "Ortung" und "Positionierung" verwendet. Während die Charakteristik der Positionierung im Wesentlichen mit jener der Lokalisierung konform ist, besteht der gemeinsame Unterschied zur Ortung darin, dass diese zweiseitig ausgerichtet ist. Die Ortung verlangt eine Rückmeldung von der zu ortenden Person bzw. vom zu ortenden Objekt. Diese Situation verlangt einen Empfänger, der Positionsdaten über den eigenen Standort aufnimmt und einen Sender, der diese Daten an den Suchenden weiterleitet. Bei der Lokalisation bzw. Positionierung fehlt dieser Rückmeldekanal (vgl. [URLb-07]). Dieser Gegensatz ist vor allem für die Selbst- und Objektlokalisierung von Bedeutung.

Zunächst muss immer der eigene Standort ermittelt werden - "Wo bin ich?" Zur Beantwortung dieser Frage werden neben den aktuellen dreidimensionalen Koordinaten x , y und z der eigenen Position auch die Ausrichtung ($0-360^\circ$) benötigt. Da der Anwendungsraum meist kleinräumig ist, kommt es oftmals zur Vereinfachung auf den zweidimensionalen Raum, wobei die so genannte Pose als dreidimensionaler Vektor (x, y, θ) definiert ist (vgl. [AKE-08]). Die Ermittlung dieser Informationen kann sowohl absolut, bezogen auf ein erdfestes, globales Koordinatensystem, als auch relativ, bezogen auf ein lokales Sys-

tem, erfolgen. Letzteres ist dabei über bestimmte koordinativ bekannte Punkte, die als Schnittstelle dienen, mit dem übergeordneten globalen System verbunden (vgl. [LIU-10]).

Neben dieser geometrischen Lokalisation, die im Wesentlichen auf Messungen basiert, lässt sich innerhalb der Robotik zusätzlich die topologische Lokalisation unterscheiden. Die Topologie befasst sich im Allgemeinen mit der Lage und Anordnung von geometrischen Objekten im Raum (vgl. [URLb-o8]). Anstelle von Messungen werden qualitative Standortschätzungen abgegeben, wobei auf eine Menge möglicher Positionen zurückgegriffen wird. Anders als bei der geometrischen Lokalisation liegt ein Graphensystem vor, innerhalb dessen Knoten die möglichen Standorte und Kanten die Verbindungen zwischen benachbarten Positionen repräsentieren (vgl. [BAD-12]). Der Vorteil der geometrischen Lokalisation ist deren Genauigkeit, die vom verwendeten Messverfahren abhängig ist. Wird die eigene Position ausgehend von einem bekannten Punkt über einen längeren Zeitraum ermittelt, kann es zu immer größer werdenden Abweichungen kommen, da sich einzelne Messfehler aufsummieren (siehe Koppelnavigation). Die topologische Lokalisation ist diesbezüglich robuster und zuverlässiger, liefert jedoch nur grobe Positionsschätzungen. H. BADINO et al. (vgl. ebd.) zeigten in ihrer Arbeit mit unbemannten, autonomen Fahrzeugen, dass die beiden aufgezeigten Methoden miteinander kombiniert werden können. Dieses hybride Verfahren wird als topometrische Lokalisation bezeichnet und nutzt die Vorteile beider Methoden. Gleichzeitig werden die Nachteile der einzelnen Verfahren aufgehoben.

- Zielbestimmung

Ist die erste Frage beantwortet, stellt sich bereits die nächste - "Wo will ich hin?" Zur Lösung dieser Fragestellung werden lediglich die Koordinaten in x-, y- und z-Richtung benötigt.

- Fahrtwegermittlung

"Wie komme ich dorthin?" ist der dritte Problembereich der Navigation und kann als "Navigation im engeren Sinne" bezeichnet werden, da dieser die beiden ersten Teilbereiche miteinschließt. Der kürzeste Weg zwischen Punkt A und B entspricht im Idealfall der euklidischen Distanz. Aufgrund der topographischen Situation ist dies, im Bereich der Navigation zu Lande, jedoch nur ein Extremfall und somit bedingt möglich. Neben Hindernissen auf direktem Weg kann auch die Geländeform eine Barriere darstellen (vgl. Abb. 4). Daher ist es notwendig diese unüberwindbaren Hürden zu erkennen, um somit den Fahrweg entsprechend anzupassen, wobei sowohl ständig die eigene Position, als auch die Positionen von Hindernissen erfasst werden müssen. Die einzelnen Teil- bzw. Problembereiche sind miteinander verflochten. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 5 vereinfacht dargestellt.



Abb. 5: Teil-, bzw. Problembereiche der Navigation im weiteren Sinne

Auf Grund der Konnektivität zwischen den einzelnen Teilbereichen ist es für eine erfolgreiche Navigation erforderlich, zu jedem Zeitpunkt während des gesamten Prozesses die drei auftretenden Fragen beantworten zu können, die stellvertretend für die drei Problembereiche der Navigation anzusehen sind. Die Beantwortung dieser Fragen wird durch unterschiedliche Methoden und Techniken ermöglicht. Jene, die für Rasenmäher-Roboter relevant sind, werden in Kapitel 7 und 8 genauer unter die Lupe genommen. Zuvor ist es jedoch notwendig auf die Entwicklungsgeschichte von Rasenmäher-Robotern im nächsten Kapitel einzugehen. Anschließend ist es möglich, sich im Kapitel 5 den Navigationsproblemen von Robotern anzunehmen. Kenntnis und Verständnis dieser speziellen Probleme sind für die Wahl der richtigen Navigationsmethoden unumgänglich.

4 DIE ENTWICKLUNGSGESCHICHTE VON RASEN-MÄHER-ROBOTERN

Dieses Kapitel versucht einen adäquaten Überblick über die Entwicklungsgeschichte von Rasenmäher-Robotern zu geben. An dieser Stelle muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass es sich dabei um kein allumfassendes Werk handeln kann, da dies den Rahmen der vorliegenden Masterarbeit sprengen würde. Dieses Kapitel erhebt somit keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da der Inhalt Stoff einer eigenen Monographie sein könnte. Dennoch wird versucht, eine kompakte Zusammenfassung über die bedeutendsten Entwicklungen im Bereich der Rasenmäher-Roboter präsentieren zu können.

Zunächst wird im ersten Unterkapitel eine Klassifikation der Rasenmäher-Roboter innerhalb der Service-Roboter vorgenommen. Um eine gewisse Übersichtlichkeit zu bewahren, ist dieses Kapitel anschließend weiter in drei verschiedene Epochen kommerzieller Rasenmäher-Roboter unterteilt. Im letzten Subkapitel werden jene Roboter unter die Lupe genommen, die im wissenschaftlichen Umfeld an Forschungseinrichtungen, Universitäten oder sonstigen Hochschulen entwickelt wurden.

4.1 Rasenmäher-Roboter innerhalb der Familie der Service-Roboter

Roboter sind seit den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts im Bereich der industriellen Fertigung, meist als Schweiß- oder Montageroboter aus Produktionshallen, rund um den Globus nicht mehr wegzudenken. Zur Jahrtausendwende wurde die Zahl der in der Industrie eingesetzten Roboter auf über eine dreiviertel Million geschätzt (vgl. [FEY-00]). Im letzten Jahrzehnt konnte ein enormer Anstieg beobachtet werden und so rechnet die International Federation of Robotics ([URLb-09]) damit, dass der Jahresabsatz von Industrierobotern im Jahr 2015 200.000 Stück überschreiten wird.

In den 1990er Jahren kam es parallel zur Entwicklung der Industrieroboter ebenfalls zu einem regelrechten Aufschwung der Service-Roboter. Diese sind nach M. HÄGELE et al. (vgl. [FEY-00]) freiprogrammierbare Bewegungseinrichtungen, die nicht für die industrielle Fertigung konzipiert und eingesetzt werden, sondern halb- oder vollautomatisiert Dienstleistungen für Menschen und Einrichtungen erbringen. Eine Auflistung mehrerer Definitionen kann in [FEY-00] nachgelesen werden. In Abhängigkeit des Einsatzgebietes können unterschiedliche Typen von Service-Robotern unterschieden werden (vgl. ebd. u. [DEA-11]).

S. FEYRER nennt in seiner Dissertation aus dem Jahr 2000 (vgl. [FEY-00]) drei potentielle Anwendungsszenarien für Service-Roboter und klassifiziert diese damit. Als erste

Kategorie nennt er Serviceroboter für den direkten Dienst an Menschen, worunter z.B. Mobilitätshilfen und Kommunikationsplattformen, Shopping-Assistenten oder Unterhaltungsroboter fallen. Der zweite Typ von Service-Robotern erbringt Dienste für Einrichtungen, z.B. Reinigungsroboter für den Innen- und Außenbereich oder Roboter zur Inspektion von Abwasserkanälen. In der dritten und letzten Kategorie befinden sich Service-Roboter, die autonome Funktionen ausführen, beispielsweise Überwachungs- und Brandbekämpfungsroboter. Gemäß dieser dreiteiligen Klassifikation würden Rasenmäher-Roboter sowohl in die zweite, als auch in die dritte Kategorie fallen.

An dieser Stelle soll außerdem ein Hinweis auf die Arbeit von S. FEYRER (ebd.) gegeben werden, in der zusätzlich zu dieser Einteilung fünf Basisfähigkeiten von Service-Robotern aufgelistet sind, auf die jedoch an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. Für mobile autonome Service-Roboter müssen jedoch, unabhängig vom Anwendungsgebiet, folgende Kriterien erfüllt werden. Der Roboter darf die Arbeitsfläche nicht verlassen und muss diese zur Gänze abarbeiten. Außerdem müssen Kollisionen mit Hindernissen verhindert werden und die Roboter dürfen nicht zu kostspielig und somit für jedermann erschwinglich sein (vgl. [BAL-08]).

Anders als S. FEYRER schlägt A.T. DE ALMEIDA in seinem Artikel ([DEA-11]) lediglich zwei Subklassen vor und bezieht sich dabei auf die International Federation of Robotics, dass Service-Roboter in Roboter für den professionellen Einsatz und Roboter für den persönlichen und häuslichen Gebrauch unterteilt werden können. In letztere Rubrik fallen unter anderem Staubsauger- und Rasenmäher-Roboter, aber auch Roboter, die z.B. benachteiligte oder ältere Menschen in ihrem Alltag unterstützen. Gemäß der Klassifizierung von S. FEYRER würden somit Rasenmäher-Roboter auch in seine erstgenannte Kategorie fallen.

Eine genaue und allseits anerkannte Einordnung von Rasenmäher-Roboter innerhalb der großen Familie der Service-Roboter gibt es somit nicht. Es kann jedoch festgehalten werden, dass Rasenmäher-Roboter Service-Roboter sind, die im Außenbereich autonom den Dienst des Rasenmähens im öffentlichen und heimischen Bereich erledigen. Im ersten Fall werden vor allem Park- und Sportanlagen sowie sonstige städtische Grünflächen für die Allgemeinheit, im zweiten Fall hingegen der eigene Garten gemäht.

R.W. HICKS und E.L. HALL führten im Jahr 2000 (vgl. [HIC-00]) eine Untersuchung über Rasenmäher-Roboter durch und kamen zum Ergebnis, dass diese folgende Vorteile aufweisen: Zum einen können Rasenmäher-Roboter eine Aufgabe übernehmen, die als langweilig und erschöpfend angesehen werden kann und zum anderen werden Menschen während des Mähens nicht Staub und Pollen ausgesetzt, wodurch Allergien bzw. allergische Reaktionen vorgebeugt wird. Außerdem kommen Menschen durch den Einsatz von Rasenmäher-Robotern nicht mit den gefährlichen Mähmessern in Kontakt. Ein weiterer

Vorteil besteht darin, dass Roboter in risikobehafteten Umgebungen, z.B. bei Ablagerungsstätten von radioaktivem Müll, arbeiten können.

In den letzten Jahren konnte ein steigender Absatz von Service-Robotern für den häuslichen Gebrauch nachgewiesen werden. Im Jahr 2009 wurden rund eine Million Staubsauger-Roboter und mehr als 26.000 Rasenmäher-Roboter verkauft. Die International Federation of Robotics schätzt zudem, dass in der aktuellen Periode 2010-2013 mehr als 6,7 Millionen Service-Roboter für den häuslichen Gebrauch verkauft werden (vgl. ebd.). Die Nachfrage ist groß und stetig steigend, was unter anderem auch auf die ständigen Weiterentwicklungen von Service-Robotern zurückzuführen ist.

Die folgenden drei Unterkapitel versuchen einen Einblick in und Überblick über die wichtigsten Entwicklungen von Rasenmäher-Robotern zu vermitteln.

4.2 Von den ersten Anfängen bis zum Jahr 2000

Im Jahr 1994 gelang dem schwedischen Hersteller Husqvarna eine revolutionäre Entwicklung, die als "Solarmower" ein Jahr später 1995 auf dem Markt kam. Es handelt sich dabei um den ersten vollautomatischen Rasenmäher-Roboter der Welt. Husqvarna ist seit diesem Zeitpunkt Marktführer in dieser speziellen Branche und baut seinen Einfluss mit weiteren Modellen und Verbesserungen ständig aus, was unter anderem auch damit zusammenhängt, dass viele Technologien und Entwürfe patentiert sind. Wie die Bezeichnung des ersten Rasenmäher-Roboters erahnen lässt, bezieht dieser seine Energie über Solarpaneele. Die Begrenzung der zu mähenden Fläche erfolgt über Induktionsschleifen (vgl. [URLb-10]). Kurze Stromimpulse sorgen dafür, dass eine Kleinspannung und ein Magnetfeld aufgebaut werden. Im Roboter befindet sich eine elektromagnetische Induktionsspule, in der bei Anstieg des Magnetfelders innerhalb der Spule eine Spannung induziert wird, deren Polarität davon abhängig ist, ob sich der Rasenmäher innerhalb oder außerhalb der zu mähenden Fläche befindet. Außerdem kann mit Hilfe eines Sensors, der am Rasenmäher montiert ist, die Signalstärke der Induktionsschleife gemessen werden. Anhand dieser Daten kann die Distanz zwischen Rasenmäher und Begrenzung berechnet werden. Diese Informationen können für die Robotersteuerung verwendet werden. Induktionsschleifen können auch über unterschiedliche Stromimpulse differenziert und somit zusätzlich für die Rückfahrt zur Ladestation oder zur Abgrenzung von Hindernissen, wie Blumenbeete u.dgl., verwendet werden (vgl. [URLb-12] u. [MEL-12]).

1995 kam ebenfalls der "RL500" des israelischen Herstellers Friendly Robotics auf den Markt. Anders als der "Solarmower" bezog der "RL500" seine Energie über aufladbare Batterien. Dieser Roboter musste jedoch vom Anwender zunächst auf dem Rasen platziert und anschließend überwacht werden, weswegen sich dieser, trotz des geringeren Verkaufspreises, gegen den "Solarmower" nicht durchsetzen konnte (vgl. [HIC-00]).

Zwei Jahre später, 1997, entwickelte Husqvarna ebenfalls einen auf aufladbaren Batterien basierenden Rasenmäher-Roboter, der ab 1998 als "Automower" verkauft wurde (vgl. ebd.).

In den ersten Jahren gab es neben Husqvarna und Friendly Robotics auch noch weitere Hersteller, die sich jedoch auf dem Markt nicht behaupten konnten. Während beim "Automower" Hindernisse mit Induktionsschleifen abgegrenzt wurden, setzte der französische Hersteller SN Eno bereits 1993 mit dem Prototyp "Atawa A34" auf eine andere Strategie. Mit Hilfe von Infrarot-Sensoren wurden Hindernisse detektiert, wodurch Kollisionen vermieden werden können. Zur Begrenzung der zu mähenden Fläche wurden jedoch ebenfalls Induktionsschleifen verwendet (vgl. ebd.).

Der Prototyp mit der Bezeichnung "Lawnranger" von Technical Solutions benötigte keine physische Abgrenzung in Form von Induktionsschleifen. Das dahinterstehende Prinzip sieht vor, dass die Grenze der zu mähenden Fläche vom Anwender selbst mittels Fernsteuerung abgemäht wird. Anschließend kann in den Auto-Modus gewechselt werden, wobei mit Hilfe von Infrarot-Sensoren nicht gemähtes Gras detektiert wird und somit der Rasenmäher, die zuvor gemähte Grenze nicht überquert (vgl. ebd.).

Die Weed Eater Corporation entwickelte in den ersten Jahren der Rasenmäher-Roboter den "Weed Eater", der mittels Solarzellen mit Energie versorgt wurde. Dieses Modell operierte ebenfalls innerhalb von vergrabenen Induktionsschleifen und wurde zusätzlich mit Berührungssensoren bestückt. Dass die dabei gemähte Fläche gespeichert und somit nicht erneut abgefahren wurde, kann als Innovation angesehen werden (vgl. ebd.).

4.3 Kommerzielle Rasenmäher-Roboter von 2000 bis 2010

Bis zum Jahr 2002 verkaufte Husqvarna beide Modelle, den "Solarmower" und den "Automower". Der mit Solarkraft betriebene Roboter konnte sich jedoch bei den Verkaufszahlen gegen sein batteriebetriebenes Pendant nicht durchsetzen, weswegen mit Jahresende 2002 dessen Produktion eingestellt wurde. Bereits ein Jahr später wurde die zweite Generation des "Automower" vorgestellt. Diese zeichnete sich durch eine umfangreichere Software inkl. Graphical User Interface aus. Im Jahr 2004 kam es zu einer Namensänderung in "Electrolux Automower". Diese Marketing-Entscheidung stiftete jedoch eher Verwirrung, weswegen zwei Jahre später eine Rückumbenennung erfolgte. 2007 konnte Husqvarna einen enormen Absatz verbuchen, da eine kleinere und größere Version des "Automowers" mit den Bezeichnungen 210C bzw. 230ACX auf den Markt kam. Letztere war binnen weniger Wochen für das restliche Jahr ausverkauft. Ein Jahr später kehrte der schwedische Hersteller zur Solarenergie zurück, allerdings nur als Hybridversion, die als "Automower Solarhybrid" verkauft wurde. 2009 wurde ein weiteres Modell, der 260ACX, vorgestellt, das für noch größere Flächen geeignet war und zudem Fehlermeldungen mit-

tels SMS an den Besitzer senden konnte. Die Integration des GSM-Moduls (Globales System für mobile Kommunikation) kann als Meilenstein in der Entwicklung von kommerziellen Rasenmäher-Robotern angesehen werden (vgl. [URLb-10]).

Das letzte Jahrzehnt wurde im Bereich der Rasenmäher-Roboter maßgeblich von Husqvarna geprägt. Es folgten ständige Verbesserungen, jedoch kaum zu nennenswerten Weiterentwicklungen hinsichtlich der Navigationsweise. Die Abgrenzung der zu mähen- den Fläche mit Hilfe von Induktionsschleifen ist bis heute State of the Art (vgl. ebd.).

Trotz der Dominanz von Husqvarna kamen in der letzten Dekade erwähnenswerte Modelle anderer Hersteller auf den Markt, wie z.B. die Produktlinie "Ambrogio" des italienischen Herstellers Centro Sistemi seit 2001 oder die unterschiedlichen "Robomow"- Modelle aus dem Hause von Friendly Robotics seit 2005.

4.4 Kommerzielle Rasenmäher-Roboter: State of the Art

Im Jahr 2011 kam es bei Husqvarna zu einer Weiterentwicklung, die wiederum als Meilenstein bezeichnet werden kann. Zusätzlich zum GSM-Modul wurde ein GPS-Modul (Globales Positionierungssystem) integriert. Damit kann der Roboter über das eigene Mobiltelefon bedient und geortet werden. Auf Grund der technologischen Fortschritte und der Einführung der dritten Generation im selben Jahr sowie einem verbesserten Modell im Jahr 2012 konnte Husqvarna erneut Marktanteile hinzugewinnen. Außerdem übernahm das schwedische Unternehmen Ende 2006 die deutsche Gardena GmbH und entwickelt seitdem eine zweite Rasenmäher-Roboterlinie namens "Gardena".

Neben den genannten Innovationen wurde im Wesentlichen die Ladetechnologie verbessert. Das Mäh- und Navigationsprinzip hat sich seit dem "Solarmower" kaum bis gar nicht verändert. Dieses ist in Abb. 6 schematisch dargestellt. Es handelt sich dabei um einen Screenshot einer Animation ([URLb-11]), die die Funktionsweise von Rasenmäher-Robotern darstellt.

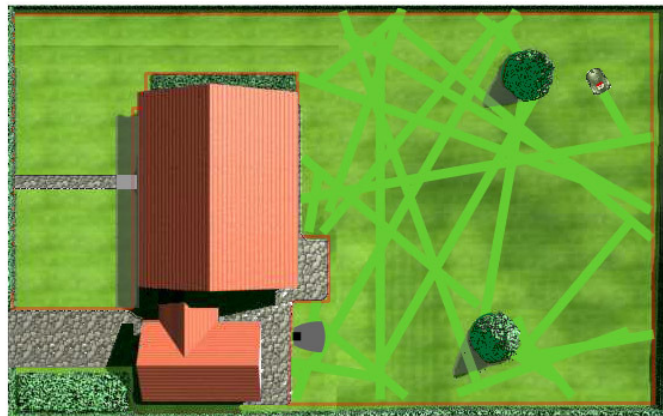


Abb. 6: Mähprinzip nach zufälligem Muster eines herkömmlichen, kommerziellen Rasenmäher-Roboter
Quelle: [URLb-11]

Abb. 6 zeigt, dass das vorherrschende Prinzip ausbaufähig ist und wesentlich energiesparender und effizienter gestaltet werden muss. Der Rasenmäher-Roboter bewegt sich wie eine Flipperkugel, entweder linear oder spiralförmig innerhalb seiner mit Induktionsschleifen vordefinierten Grenzen, anstelle die zu mähende Fläche systematisch auf schnellstem Wege zu befahren.

Intelligente Roboter dienen dazu, menschliche Aufgaben zu übernehmen. Anstelle von Sinnesorganen sind Roboter mit Sensoren ausgestattet, die in Summe die menschliche Sinneswahrnehmung übertreffen können. *"Sensors are the key component of autonomous systems; they replace the eyes and ears of human operators."* ([URLa-21], S. 11) Roboter mit sogenannter künstlicher Intelligenz arbeiten nicht nur automatisch, hochgenau und unermüdlich, sondern sind außerdem lernfähig (vgl. [HIC-00]). Angesichts dieser Tatsachen kann, in Anbetracht der Mäh- und Navigationsweise der herkömmlichen, kommerziellen Rasenmäher-Roboter, nicht zwingend von einem intelligenten System gesprochen werden.

Dieses Prinzip liegt dennoch den meisten zurzeit erhältlichen Rasenmäher-Robotern zu Grunde, die außerdem häufig über Kipp- und Regensensoren verfügen. "Ambrogio" ließ mit der L50-Serie, die ohne Begrenzungskabel auskommt, aufhorchen. Allerdings ist dieser Roboter nur für kleine Areale geeignet und benötigt visuelle Barrieren, wie z.B. kleine Hecken, Steine oder Platten, die mittels Sensoren als Grenzen wahrgenommen werden (vgl. [URLb-13]). Die Wahl zwischen vergrabenen Induktionsschleifen und sichtbaren Grenzen, z.B. in Form von Steinen, erscheint wenig zufriedenstellend.

Die Konsumenten haben heutzutage, trotz des überschaubaren Marktes, die Qual der Wahl. Tonangebende Unternehmen wie Husqvarna ("Automower" und "Gardena"), Centro Sistemi ("Ambrogio"), Friendly Robotics ("Robomow") oder Belrobotics ("Bigmow", "Parcmow" und "Greenmow") bieten unterschiedliche Modelle, für alle Rasenflächen an. Zusätzlich gibt es vor allem außerhalb Europas weitere kleinere Unternehmen, die ebenfalls Rasenmäher-Roboter anbieten. Unterschiede sind vor allem in der Bauweise und Bedienbarkeit sowie bei zusätzlichen Features, wie z.B. GSM- oder GPS-Module, zu finden. Die Navigationsstrategie ist bei kommerziellen Rasenmäher-Robotern jedoch, wie bereits erwähnt, weitestgehend ident, anders als im wissenschaftlichen Bereich, in dem unterschiedliche Prototypen an verschiedenen Forschungseinrichtungen entwickelt werden.

4.5 Rasenmäher-Roboter im wissenschaftlichen Umfeld

Der Wissenschaftsbereich bietet viele Möglichkeiten über den eigenen Tellerrand hinweg zu sehen und anders als in der freien Marktwirtschaft innerhalb eines geschützten Bereiches Grenzen zu überschreiten und Türen zu mutigen Neuentwicklungen zu öffnen. Die

Wissenschaft benötigt jedoch eine passende Kommunikationsplattform, die es Forschern nicht nur ermöglicht ihre Ergebnisse zu präsentieren, sondern auch eine Gelegenheit bietet, sich mit anderen Personen und Institutionen auszutauschen. Diese zentralen Plattformen sind für den Wissenstransfer und die stetige Weiterentwicklung unumgänglich.

Im Bereich der Rasenmäher-Roboter stellt das Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) ([URLb-14]) eine erste Anlaufstelle dar. Es handelt sich dabei um einen internationalen Berufsverband, der jährlich mehrere Konferenzen, Symposien und Workshops zu unterschiedlichen Themenbereiche anbietet. Diese Veranstaltungen werden unter anderem von Forschern und Entwicklern von Rasenmäher-Roboter zur Präsentation ihrer Resultate genutzt, wovon ein Auszug an dieser Stelle gezeigt wird.

J. SMITH et al. (vgl. [SMI-05]) von der Miami University, USA, stellten im Jahr 2005 einen Rasenmäher-Roboter vor, der mit Hilfe einer dGPS-Einheit (differentielles Globales Positionierungssystem) und Odometriedaten entlang eines vordefinierten Pfades den Rasen mähen konnte. Eine begrenzende Induktionsschleife ist somit nicht notwendig. Die Lagegenauigkeit des Roboters lag bei 2 inch.

Der Prototyp von S. BING-MIN et al. (vgl. [SHI-08]) von der National Chung Hsing University von Taiching, Taiwan, der im Jahr 2008 präsentiert wurde, setzt hingegen auf eine andere Strategie. Der Roboter erfasst seine Grenzen selbst. Dazu ist es im Zuge der Installation notwendig, den Roboter vor seinem ersten Einsatz manuell über die gewünschte Grenze zu befördern, wobei via dem Globalen Positionierungssystem (GPS) Koordinaten aufgezeichnet werden, die nach dem Postprocessing Zentimeter-Genauigkeit aufweisen. Dieser Ansatz wurde im Jahr 2010 von P.-M. HSU et al. (vgl. [HSU-10]), ebenfalls von der National Chung Hsing University, aufgegriffen und durch eine neue Pfadplanungsstrategie verbessert.

Einen umfassenden Ansatz lieferte im Jahr 2011 M. WASIF (vgl. [WAS-11]) von der University of Gujrat, Pakistan. Sein vorgestellter Prototyp verwendete das Globale Positionierungssystem (GPS) zur globalen und Odometriesensoren zur lokalen Lokalisation. Nach dem Start sucht der Roboter mit Hilfe einer Kamera Gras, das anhand bestimmter Filter extrahiert und somit ermittelt werden kann. Ob eine Rasenfläche bereits gemäht wurde oder noch zu mähen ist, wird unter Einsatz geeigneter Sensoren erfasst. Hindernisse werden mittels Sonartechnologie detektiert, wodurch ein neuer Kurs eingeschlagen werden kann.

Neben den Veranstaltungen des Institute of Electrical and Eletroncis Engineers war die von 2004 bis 2012 jährlich stattfindende Robotic Lawn Mower Competition (s. Abb. 7) des Institute of Navigation (ION) ([URLb-01]), bei der unterschiedliche Teams von verschiedenen Forschungseinrichtungen aus den Vereinigten Staaten mit ihren Prototypen in einem Wettstreit traten, eine wichtige Plattform. Innerhalb dieser neun Jahre traten über

450 Studenten von 25 verschiedenen universitären und sonstigen wissenschaftlichen Einrichtungen gegeneinander an. An der bislang letzten Veranstaltung, die vom 31. Mai bis 2. Juni, 2012 in Beavercreek, Ohio, abgehalten wurde, nahmen zwölf Universitäten an einem statischen und einem dynamischen Wettbewerb teil (vgl. [URLb-01]).



Abb. 7: Logo der ION Robotic Lawn Mower Competition

Quelle: [URLb-01]

Der Unterschied zwischen diesen beiden Wettbewerben liegt in der unterschiedlichen Form des zu mähenden Feldes. Außerdem treten beim dynamischen Bewerb statische und dynamische Hindernisse, in Form eines Blumenbeetes und Zaunes bzw. einer ferngesteuerten Hundeattrappe, auf. Das Regelwerk sieht vor, dass der Roboter innerhalb von fünf Minuten startbereit sein muss, wobei eine maximale Mähzeit von 20 Minuten vorgegeben ist. Der Roboter muss außerdem für alle Wettersituationen geeignet und zusätzlich mit einem Not-Aus-Schalter ausgestattet sein. Wird dessen Kontakt geschlossen muss der Roboter in der Lage sein, innerhalb von drei Sekunden sowie nach maximal zwei Meter zum völligen Stillstand zu kommen. Aus weiteren Sicherheitsgründen müssen die rotierenden Mähmesser der Roboter stets verdeckt sein, wobei ständiger Bodenkontakt vorgeschrieben ist. Außerdem darf eine Geschwindigkeit von über zehn Kilometer pro Stunde nicht überschritten werden (vgl. [URLa-22]).

Beim statischen Wettbewerb beträgt die rechteckige Feldgröße 10x15 Meter, inkl. einen angrenzenden zwei Meter breiten Sicherheitsstreifen. Die zu mähende Fläche ist mit Hilfe einer weißen Kalklinie, ähnlich wie ein Fußballfeld, abgegrenzt. Das Feld des dynamischen Wettbewerbs ist hingegen nicht rechteckig und ist des Weiteren in zwei Zonen unterteilt. Eine schematische Darstellung beider Felder ist in Abb. 8 zu sehen.



Abb. 8: Felder des statischen (l) und dynamischen (r) Wettbewerbes der ION Robotic Lawn Mower Competition

Quelle: [URLa-22], modifiziert

Das Endergebnis setzt sich beim statischen Wettbewerb zu 80% aus dem Mäh-Wettbewerb und zu je zehn Prozent aus dem Technischen Report und der technischen Präsentation zusammen, die bestimmte Vorgaben aufweisen. Das Resultat des Mäh-Wettbewerbes ist der Prozentsatz der gemähten Fläche. Abzüge gibt es im Falle einer Überschreitung der Grenzlinie sowie bei Berührungen mit Hindernissen. Für den dynamischen Wettkampf gibt es dabei geringfügige Änderungen bei der Auswertung. Das Preisgeld für die drei besten Teams je Teilbewerb richtet sich nach der Höhe der Sponsorengelder und bewegt sich im Rahmen von 5.000 \$ bis 15.000 \$. Zusätzlich dürfen die Gewinner ihren Prototyp an der ION GNSS Konferenz präsentieren (vgl. ebd.).

Die ION Robotic Lawn Mower Competition zeigt, dass in Bezug auf die Navigationsweise von Rasenmäher-Robotern vieles möglich ist. Die vorgestellten Prototypen sind mit einer Vielzahl von Sensoren bestückt, die meist über eine zentrale Kontrolleinheit in Verbindung stehen und Daten liefern, anhand derer die weitere Navigationsstrategie weitergegeben wird. Die zu mähende Fläche wird bei vielen Robotern mittels differentieller Globaler Navigationssatellitensysteme (dGNSS) erfasst. Zur Positionsbestimmung während der Navigation werden Realtime-Kinematic-Systeme (RTK) verwendet. Unterstützt werden diese Verfahren mit Odometriedaten oder einer inertialen Messeinheit (IMU - Inertial Measurement Unit). Oftmals handelt es sich um intelligente Systeme, die ihre Umgebung selbst erfassen und eingrenzen. Mit Hilfe von Laserscannern, optischen Systemen, Ultraschall- oder Berührungssensoren werden Hindernisse detektiert. Anhand der ermittelnden Informationen können Ausweichstrategien initiiert werden.

Ob vordefinierter Pfad oder selbstständige Navigation, Rasenmäher-Roboter sind heutzutage nicht mehr zwingend auf begrenzende Induktionsschleifen angewiesen, innerhalb derer diese sich wie ein nie zu Ruhe kommender Ping Pong Ball verhalten. Die Wissenschaft zeigt hinsichtlich der Navigationsweise neue zukunftsweisende Möglichkeiten auf, die speziell in den Kapiteln 7 und 8 thematisiert werden.

In diesem Kapitel wurde ein Überblick auf die Entwicklungsgeschichte von Rasenmäher-Roboter geboten. Es wäre falsch zu sagen, dass sich in den letzten Jahren im kommerziellen Bereich wenig getan hätte. Die Ergebnisse und Entwicklungen aus dem wissenschaftlichen Bereich zeigen jedoch, dass weitere bedeutende Verbesserungen schon jetzt möglich sind. Besonders die Resultate der einzelnen ION Robotic Lawn Mower Competitions zeigen, dass die Effizienz von Rasenmäher-Roboter wesentlich gesteigert werden kann.

Bevor die technologischen Möglichkeiten genauer unter die Lupe genommen werden, werden im nächsten Kapitel Navigationsprobleme von Robotern, die für die Entwicklung berücksichtigt werden müssen, analysiert.

5 NAVIGATIONSPROBLEME VON ROBOTERN

Sowohl Menschen als auch Roboter können mit Navigationsproblemen konfrontiert werden. Die Art der Probleme ist dabei durchaus vergleichbar. Wie in einem vorangegangenen Kapitel bereits erwähnt worden ist, dienen intelligente Roboter dazu, menschliche Aufgaben zu übernehmen. Damit dies gewährleistet werden kann, sind diese Roboter mit unterschiedlichen Sensoren bestückt, die das menschliche Sinneswahrnehmungsvermögen nachahmen sollen (vgl. [HIC-00]). Dabei sind Roboter Menschen oftmals überlegen. Allerdings verfügt der Mensch über sein Gehirn, das es ihm ermöglicht, nicht nur auf bestimmte Stimuli zu reagieren, sondern auch Zusammenhänge zu erkennen und entsprechend der gesammelten Erfahrung Interpretationen abzuleiten und angemessene Handlungen zu setzen. Den Entwicklern von Robotern stellt sich damit die schwierige Aufgabe, die Aktivitäten und Funktionen des menschlichen Gehirns robotergerecht umzusetzen und zu implementieren.

Die Teil-, bzw. Problembereiche der Navigation im weiteren Sinne wurden bereits in Kapitel 3 thematisiert. Zur Erinnerung: Es handelt sich dabei um die Beantwortung der Fragen "Wo bin ich?", "Wo will ich hin?" und "Wie komme ich dorthin?". Neben diesen drei Problembereichen sind innerhalb der Robotik drei weitere Punkte zu berücksichtigen. Es handelt sich dabei um die Positionsverfolgung, die globale Lokalisation und das so genannte Kidnapped Robot Problem, die in weiterer Folge behandelt und erläutert werden. Gemäß dieser Reihenfolge kommt es zu einer stetigen Steigerung der Komplexität des Problems, dargestellt in Abb. 9.

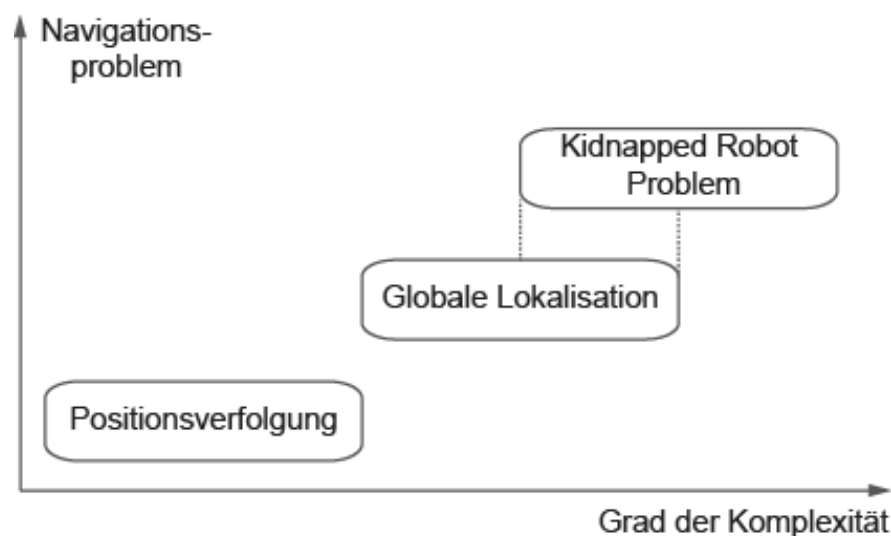


Abb. 9: Navigationsprobleme von Robotern und deren Komplexität

Im Wesentlichen sind diese Probleme dem ersten Teilbereich der Navigation, der Lokalisation, zuzuordnen, wobei durchaus Überschneidungen zu den beiden anderen Teilbereichen vorkommen (vgl. [LIU-10] u. [ZHA-09]).

- Positionsverfolgung

Die Positionsverfolgung stellt das einfachste dieser drei Probleme dar. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Roboter seine Startpose (x,y,Θ) kennt und sich in einer bekannten Umgebung befindet. Ausgehend von diesem bekannten Standort werden fortlaufend die zurückgelegte Distanz und eingeschlagene Richtung ermittelt. Diese können im einfachsten Fall mit Hilfe eines Odometers, das die Radumdrehungen misst und einem Kompass zur Richtungsmessung erfasst, werden. Die Distanz wird dabei nicht direkt sondern indirekt gemessen, wodurch es zur Fehlerfortpflanzung kommen kann. Die Fehler werden aufsummiert und somit über die Zeit hinweg immer größer. Mögliche Fehlerquellen sind z.B. durchdrehende Räder auf feuchtem oder nassem Untergrund. Hinsichtlich dieses Problems gilt es diesen zunehmenden Fehler so gut wie möglich zu kompensieren (vgl. [CEN-08], [LIU-10] u. [ZHA-09]).

- Globale Lokalisation

Weitaus schwieriger als das Problem der Positionsverfolgung ist die globale Lokalisation. Dabei handelt es sich um die Selbstlokalisierung des Roboters von einem unbekannten Startpunkt in einer bekannten Umgebung (vgl. ebd.).

- Kidnapped Robot Problem

Intelligente Roboter verfügen stets über Informationen betreffend ihrem aktuellen Standort in Form absoluter oder relativer Koordinaten sowie ihrer gegenwärtigen Ausrichtung. Dies ist die Antwort auf die Frage "Wo bin ich?". Während des Arbeitsprozesses kann es jedoch zu unerwarteten und unerwünschten Ereignissen kommen, bei denen der Roboter von seiner aktuellen Position versetzt wird. Bei Rasenmäher-Robotern kann dies dann der Fall sein, wenn z.B. ein Hund den Rasenmäher verschiebt oder dieser von einem Fußball getroffen und dadurch von seiner aktuell bekannten an eine unbekannte Position unfreiwillig versetzt wird. Des Weiteren kann dieses Problem auftreten, wenn der Roboter z.B. an einer steilen Stelle der zu mähenden Fläche abrutscht. Der Roboter muss dann in der Lage sein, seine Positionsveränderung zu erkennen, seine neue Position zu bestimmen und zu seiner ursprünglichen Position zurückkehren, um den Arbeitsprozess zu beenden (vgl. [CEN-08]). Da im Zuge der Lösung des Kidnapped Robot Problems die Roboter-Position bestimmt werden muss, ergibt sich ein Überschneidungsbereich mit der globalen Lokalisation, ebenfalls in Abb. 9 ersichtlich. Das Kidnapped Robot Problem wird daher in

der Fachwelt auch oftmals als Teilbereich der Globalen Lokalisation angesehen (vgl. [CEN-08] u. [XIE-10]).

Zur Lösung dieser beiden Probleme gibt es unterschiedliche Ansätze, die an dieser Stelle auszugsweise kurz erläutert werden. Auf technische Details kann jedoch nicht eingegangen werden, da dies den Rahmen dieses Kapitels sprengen würde. Daher wird auf die entsprechenden Beiträge verwiesen.

Im Jahr 2008 präsentierten B.-M. SHIU et al. (vgl. [SHI-08]) einen Prototyp der im Zuge der Installation die Grenzen der zu mähenden Fläche mit Hilfe des Globalen Positionierungssystems (GPS) erfasste. Anhand eines vordefinierten Pfades mähte der Roboter die Rasenfläche ab, wobei ständig die Position ermittelt wurde. Trat das Kidnapped Robot Problem auf, wechselte der Roboter in den GPS-Modus und ermittelte seine Position, von der aus die ursprüngliche Position angesteuert wurde (vgl. ebd.).

Ein auf das Globale Navigationssatellitensystem (GNSS) basierendes Verfahren kommt bei Prototypen von Rasenmäher-Robotern oft zur Anwendung. Derartige Systeme, die zur Lokalisierung des Roboters eingesetzt werden, sind in [MEL-12], [URLa-01], [URLa-02], [URLa-05], [URLa-11], [URLa-06], [URLa-07], [URLa-08], [URLa-09], [URLa-10], [URLa-12], [URLa-14], [URLa-15], [URLa-16], [URLa-17], [URLa-18], [URLa-19], [URLa-20] und [URLa-21] beschrieben. Anhand der Vielzahl unterschiedliche Beiträge zu diesem Thema kann die Bedeutung Globaler Navigationssatellitensysteme (GNSS) für die Entwicklung intelligenter Rasenmäher-Roboter erahnt werden. Tatsächlich kann diese Technologie als *Mainstream* innerhalb dieses Forschungsbereiches angesehen werden. Mehr dazu ist in Kapitel 7.1.1 nachzulesen.

Ein System, das bei Ausfall bzw. starker Störung des GNSS-Signals trotzdem zur Lösung des globalen Lokalisationsproblems führt, wurde von H. BADINO et al., 2012 (vgl. [BAD-12]) vorgestellt. Es handelt sich dabei um eine topometrische Methode, bei der visuelle Technik eingesetzt wurde. Das System wurde für gewöhnliche Fahrzeuge entwickelt, kann aber auch auf Roboter übertragen werden. Die Systeminstallation entspricht einer Erstellung einer Karte aus gerichteten Graphen, wozu es nötig ist, das Gebiet mehrmals zu befahren. Währenddessen wird in festgesetzten Abständen die aktuelle Position mit Hilfe des Globalen Positionierungssystems (GPS) erfasst. Verfahren, bei denen gleichzeitig eine Karte erstellt und eine Lokalisation durchgeführt wird, werden als SLAM-Verfahren (Simultaneous Localization and Mapping) bezeichnet. Zusätzlich werden bei diesem Ansatz für jeden gespeicherten Standort visuelle Aufnahmen mit Hilfe von zwei Kameras gemacht. Das dahinterstehende Konzept sieht vor, dass bei Ausfall des GNSS-Signals das Fahrzeug bzw. der Roboter neue Aufnahmen von seiner Umgebung macht und diese mit den in einer Datenbank gespeicherten Bildern abgleicht, wobei ein Bayes-Filter angewandt wird. Dies ermöglicht die Selbstlokalisierung (vgl. ebd.). Der Bayes-Filter wurde ebenfalls

in [AKE-08] zum Image-Abgleich und somit zur globalen Lokalisation für autonome Roboter verwendet.

Weitere Ansätze, die ebenfalls auf visuelle Techniken basieren, werden für Fußball-Roboter in [LIU-10] und in [LV-11] unter Verwendung der weißen Außenlinien, sowie für Staubsauger-Roboter in [LEE-12] beschrieben.

Anstelle visueller Techniken verwendeten J. XIA et al. im Jahr 2012 (vgl. [XIAa-10]) einen laser-basierten Distanzmesser, wobei ebenfalls eine Karte erstellt wurde. Diese konnte mit einer bestehenden Karte unter Verwendung eines SLAM-Algorithmus abgeglichen werden, wodurch wiederum die Position des Roboters ermittelt wurde.

Weitere Beispiele für die Verwendung von Distanzmessern, die zur globalen Lokalisation und zur Lösung des Kidnapped Robot Problems eingesetzt wurden, sind in [CEN-08] und [ZHA-09] beschrieben. Diese Methoden konnten sich im Bereich der Rasenmäher-Roboter jedoch nicht wirklich durchsetzen.

In diesem Kapitel wurden die drei wesentlichsten Navigationsprobleme von Robotern im Allgemeinen thematisiert. Es handelt sich dabei mehr oder weniger um eine Teilmenge des ersten Problembereiches der Navigation im weiteren Sinne, der Lokalisation. Außerdem wurden auszugsweise Problemlösungsansätze kurz erläutert, ohne dabei ins Detail zu gehen, da eine intensive Auseinandersetzung dieser Thematik, speziell bezogen auf Rasenmäher-Roboter, Inhalt der Kapitel 7 und 8 ist. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass vor allem die Globale Navigationssatellitensystem-Technologie einen besonderen Stellenwert bei Outdoor-Anwendungen innerhalb der Robotik einnimmt.

Bevor jedoch eine ernsthafte Vertiefung in den Bereich der Datenerfassungsmethoden und Navigationsstrategien im Kontext von Rasenmäher-Roboter erfolgt, werden zunächst im nachfolgenden Kapitel die Anforderungen an die Navigationsweise für Rasenmäher-Roboter diskutiert.

6 ANFORDERUNGEN AN INTELLIGENTE RASEN-MÄHER-ROBOTERSYSTEME

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Online-Umfrage, die vom 08.11.2012 bis zum 08.12.2012 einen Monat lang einer ausgewählten Probandengruppe zur Verfügung gestellt wurde, sowohl im Detail, als auch zusammenfassend präsentiert. Die Resultate sind für die Beantwortung der ersten Forschungsfrage essentiell. Zur Erinnerung:

Forschungsfrage 1:

"Welche Anforderungen, hinsichtlich Funktionalität und Genauigkeit werden an intelligente Rasenmäher-Robotersysteme gestellt?"

Bevor auf die Umfrageergebnisse genauer eingegangen wird, werden im folgenden Unterkapitel zunächst das Umfragedesign, die dahinterstehende Methodik sowie die vorliegenden Rahmenbedingungen kurz erläutert.

6.1 Umfragedesign

Bei der, im oben genannten Zeitraum durchgeführten, Online-Umfrage (E-Survey) handelt es sich um eine klassische Experten-Befragung im Querschnittsdesign, die in einer deutschen (siehe Anhang) und englischen Version ausgesendet wurde. Die Teilnehmer wurden aufgrund ihrer Tätigkeit mit Rasenmäher-Robotern bewusst ausgewählt. Hinsichtlich des Tätigkeitsbereiches wurden drei Probandengruppen differenziert:

- Gruppe I: "Forschung & Entwicklung im wissenschaftlichen Bereich"
- Gruppe II: "Forschung & Entwicklung im industriellen Bereich"
- Gruppe III: "Vermarktung und Verkauf"

Die potenziellen Teilnehmer wurden per E-Mail kontaktiert und dabei gebeten an der Umfrage teilzunehmen sowie den Online-Fragebogen auszufüllen.

Die erste Gruppe "Forschung & Entwicklung im wissenschaftlichen Bereich" setzt sich im Wesentlichen aus Teilnehmern der ION Robotic Lawn Mower Competition zusammen. Dabei wurden in Summe 35 Personen, von denen Kontaktinformationen bekannt waren, persönlich via E-Mail kontaktiert. Sechs Nachrichten konnten dabei nicht zugestellt werden, da die E-Mail Adressen scheinbar nicht mehr aktuell waren. Aus diesem Grund wurden zusätzlich die Veranstalter der ION Robotic Lawn Mower Competition kontaktiert, die freundlicherweise den Online-Fragebogen ebenfalls an Teilnehmer des letzten Wettbe-

werbes weiterleiteten, in der Hoffnung alle beteiligten Teammitglieder zu erreichen, um damit Stichprobe zu erhöhen.

Die Kontaktaufnahme zu Personen, die zur zweiten Gruppe "Forschung & Entwicklung im industriellen Bereich" zugeordnet werden können, gestaltete sich erheblich schwieriger. Sämtliche namhafte Unternehmen, die auch in Kapitel 4 erwähnt wurden, wurden bereits im Zuge der Recherchearbeit zur Entwicklungsgeschichte von Rasenmäher-Robotern erfolglos kontaktiert. Eine Ausnahme stellte dabei die Firma Belrobotics aus Belgien dar. Informationen zur Entwicklungsgeschichte konnten, aufgrund mangelnder Zeit zum Ende des Geschäftsjahres 2012, zwar nicht geliefert werden, jedoch wurde einer Teilnahme an der Online-Umfrage zugestimmt.

In der Gruppe "Vermarktung und Verkauf" wurden zwölf Personen persönlich kontaktiert, deren Kontaktdaten über die Webseiten ihrer Unternehmen zur Verfügung standen. Offizielle Antworten seitens der einzelnen, einschlägigen Unternehmen gab es bedauerlicherweise nicht.

Drei Wochen nach der ersten Fragebogen-Aussendung wurde eine Erinnerungsnachricht, ebenfalls per E-Mail, versendet. Als zusätzlichen Anreiz zur Teilnahme wurde die Weiterleitung der Ergebnisse in Aussicht gestellt.

Aufgrund der vorliegenden Situation kann an dieser Stelle keine Auskunft über die exakte Anzahl der tatsächlich übermittelten Online-Fragebögen und somit über die Stichprobengröße, gemacht werden, da zum einen nicht alle potenziellen Teilnehmer persönlich kontaktiert wurden, bzw. werden konnten und zum anderen, da keine offiziellen Rückmeldungen von Unternehmen zu verzeichnen sind. Wie viele Personen über die Veranstalter der ION Robotic Lawn Mower Competition sowie über Belrobotics kontaktiert wurden, ist unbekannt. Außerdem kann nicht sichergestellt werden, dass kontaktierte Unternehmen die Online-Umfrage zwar an ihre Mitarbeiter weitergeleitet, aber nicht geantwortet haben.

Fest steht, dass 48 Personen persönlich informiert wurden, wobei in Summe 42 erreicht werden konnten. Die Anzahl zusätzlich übermittelter Fragebögen kann lediglich geschätzt werden. In Anbetracht der veröffentlichten Anzahl der Teilnehmer der letzten ION Robotic Lawn Mower Competition 2012 sowie Mitarbeiter der Fachabteilungen der Firma Belrobotics wird eine tatsächliche Stichprobengröße von 55 bis 65 Personen geschätzt. An dieser Stelle sei auf den bestehenden Unsicherheitsfaktor dieser Schätzung hingewiesen.

Die Probanden waren dazu aufgefordert einen online abrufbaren Fragebogen auszufüllen. Dieser bestand in der Basisversion, die alle drei Gruppen vorgelegt wurde, aus 27 bis 30 Einzelfragen, in Abhängigkeit der Antworten auf Gabelungsfragen. Die Partizipierenden, die der Gruppe "Vermarktung und Verkauf" zugehörig sind, mussten 30 bis 34

Fragen beantworten. Die Gruppenzuweisung erfolgte durch die Teilnehmer, mit Hilfe der Beantwortung einer entsprechenden Frage, selbst. Bei den gestellten Fragen handelte es sich formal betrachtet um dichotome geschlossene Fragen, Alternativfragen inkl. Rangordnung sowie offene Fragen, die vor allem darauf ausgerichtet waren, Einstellungen und Überzeugungen zu ermitteln.

Die Auswertung erfolgte mittels statistischer Analysen der Deskriptiven Statistik und entspricht dem Inhalt der nächsten zwei Unterkapitel.

6.2 Die Umfrageergebnisse im Detail

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Fragen im Detail präsentiert. In Summe wurde der Fragebogen von 16 Personen vollständig ausgefüllt. Sechs weitere Probanden brachen die Befragung vorzeitig ab und lieferten somit nur unvollständige Daten, die bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurden. Die Beendigungsquote liegt somit bei 72,7 %.

[Anm.: Die in diesem und dem folgenden Kapitel präsentierten Prozentangaben beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, ausschließlich auf die 16 vollständig ausgefüllten Fragebögen.]

Die geschätzte Stichprobengröße beträgt 55 bis 65 Probanden. Die Spannbreite liegt somit bei zehn Personen. Bei 16 Teilnehmern liegt somit die Rücklaufquote zwischen 24,62 % und 29,09 %. Das Arithmetische Mittel beträgt 26,85 %. Die Höhe der Rücklaufquote ist von vielen Faktoren abhängig, wie z.B. von der Stichprobengröße, Art der Umfrage, Zielgruppe und Länge der Befragung. Bei schriftlichen Befragungen bzw. bei Online-Umfragen sind generell kleinere Rücklaufquoten zu erwarten, weswegen in Anbetracht der Größe der vorliegenden Stichprobe von einer durchschnittlichen Rücklaufquote gesprochen werden kann. Verallgemeinernde Aussagen sind dabei jedoch kaum möglich, weswegen auf mögliche Hypothesen und Methoden der Schließenden Statistik bewusst verzichtet wird. Stattdessen werden die Ergebnisse, unter Berücksichtigung der aufgezeigten Rahmenbedingungen, gemäß der deskriptiven Statistik analysiert. Aussagen, die auf die Grundmenge abgeleitet werden, sind daher mit Vorsicht zu genießen.

Der erste Themen- bzw. Frageblock enthält so genannte Eisbrecherfragen, die einen sanften Einstieg in den Fragebogen ermöglichen. Die erste Frage zielte darauf ab herauszufinden, ob die Probanden, die im Zuge ihrer Tätigkeit mit Rasenmäher-Roboter zu tun haben, auch selbst einen Rasenmäher besitzen und wenn ja, ob es sich dabei um einen Rasenmäher-Roboter handelt. Rund 68,75 % der Probanden besitzen demnach einen Rasenmäher, wobei innerhalb dieser Gruppe lediglich 12,50 % einen Rasenmäher-Roboter ihr Eigen nennen können (siehe Abb. 10).

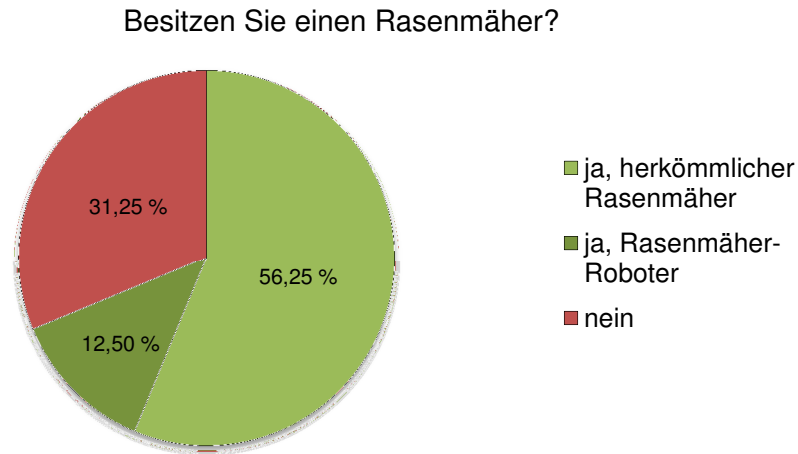


Abb. 10: Ergebnis der Frage "Besitzen Sie einen Rasenmäher?" und Anteil der Rasenmäher-Roboter

Die nächste Frage hatte die Aufgabe festzustellen, welcher Probandengruppe die Teilnehmer zugehörig sind. Der Großteil der Probanden ist dem Bereich "Forschung und Entwicklung in der Wissenschaft" zuzuordnen, was unter anderem mit der Dominanz dieser Gruppe in der Stichprobe zusammenhängt. Demnach sind 68,75 % der Partizipierenden der ersten und nur 18,75 % der zweiten bzw. 12,50 % der dritten Gruppe zuzuordnen (siehe Abb. 11). Aufgrund des vorliegenden Sachverhaltes sind Vergleiche zwischen den einzelnen Probandengruppen äußerst schwierig.

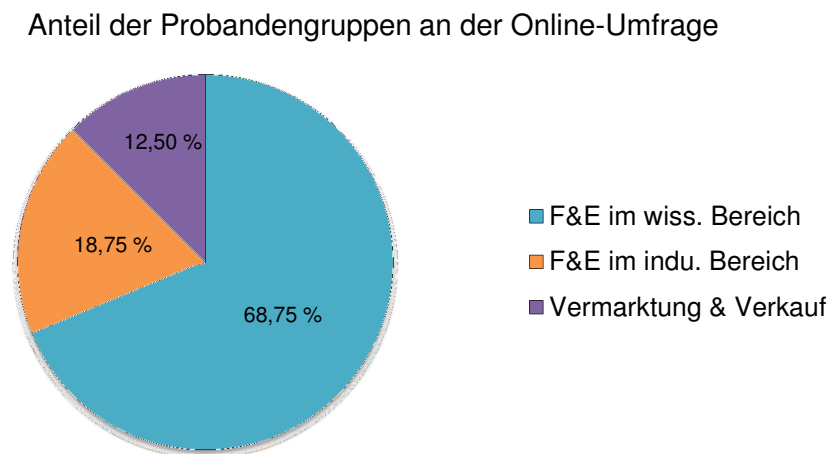


Abb. 11: Anteil der Probandengruppen an der Online-Umfrage

Interessanterweise besitzen die Teilnehmer der zweiten Gruppe zwar allesamt einen Rasenmäher, jedoch keinen Rasenmäher-Roboter, obwohl die betreffenden Personen in ihrem Beruf mit der Forschung und Entwicklung von Rasenmäher-Robotern zu tun haben.

Der nächste Fragenblock bezieht sich speziell auf die Funktionsweise von Rasenmäher-Robotern. Dazu wurde in der ersten Frage ermittelt, wie effizient die Probanden das dominierende Begrenzungssystem von Rasenmäher-Robotern mittels Induktionsschleife einschätzen. Die Mehrheit der Probanden 37,50 %, ist der Meinung, dass dieses System ausreichend ist. 6,25 % bzw. 12,50 % schätzen es als sehr effizient, bzw. effizient ein. Hingegen sind 25 % der Meinung, dass es wenig effizient und 6,25 % nicht effizient ist. Weitere 12,50 % konnten dazu keine Aussage machen (siehe Abb. 12).

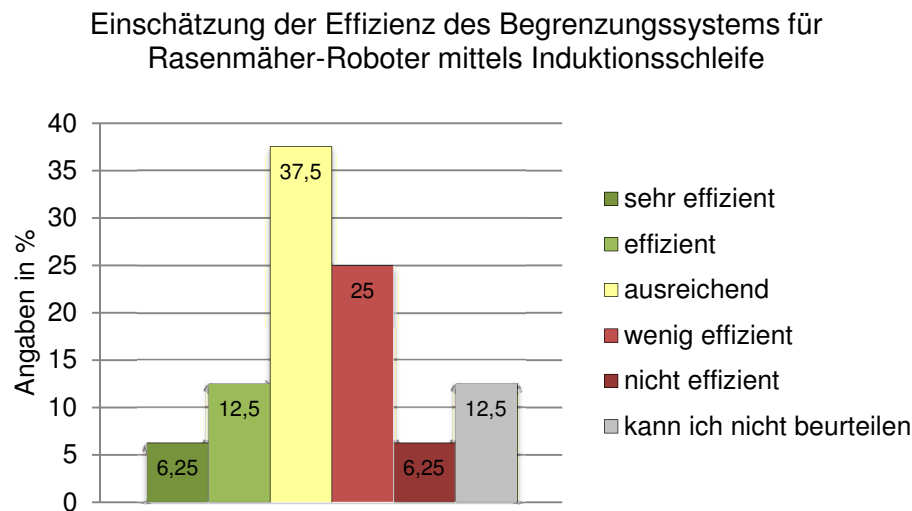


Abb. 12: Einschätzung der Effizienz des Begrenzungssystems für Rasenmäher-Roboter mittels Induktionsschleife

Entgegen den Erwartungen ist die erste Gruppe bezüglich dieser Frage gespalten. Von den insgesamt elf Probanden dieser Gruppe ist je eine Person der Meinung, dass das Begrenzungssystem mittels Induktionsschleife effizient bzw. sehr effizient ist. Fünf weitere halten dieses für ausreichend. Zwei hingegen für wenig effizient und nur eine Person für nicht effizient. Ein Proband konnte diesbezüglich keine Einschätzung abgeben. Da sich die Personen dieser Gruppe mit der Weiterentwicklung von Rasenmäher-Robotern beschäftigen und dabei oftmals neue Technologien erproben, wurde im Vorfeld der Untersuchung eine hohe Abneigung gegen das dominierende Begrenzungssystem mit Hilfe von Induktionsschleifen erwartet.

Die nächste Frage bezieht sich auf das Schema, nach dem der Rasenmäher-Roboter die Rasenfläche idealerweise abmähen sollte. Zur Auswahl standen "per Zufallsmuster", "per Pfadplanungsstrategie" und "Sonstiges", wobei die Möglichkeit bestand, einen Kommentar abzugeben. 25 % bevorzugten demnach Variante A mittels Zufallsmuster, eine Strategie, die bei den meisten aktuell zum Verkauf stehenden Geräten zur Anwendung kommt. 68,75 % würden hingegen eine intelligente Pfadplanungsstrategie vorziehen und eine Person bzw. 6,25 % wählten "Sonstiges" (siehe Abb. 13).

Meinung zum Mäh-Schema von Rasenmäher-Robotern

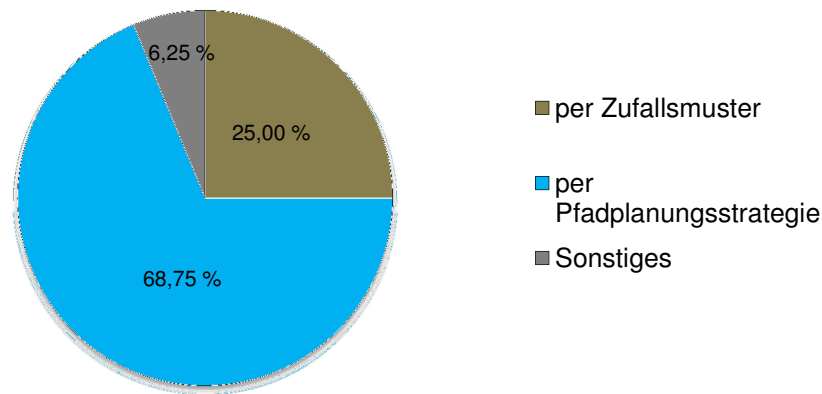


Abb. 13: Bevorzugtes Mäh-Schema von Rasenmäher-Roboter

Jener Teilnehmer, der "Sonstiges" wählte, fügte einen Kommentar hinzu, in dem er ein hybrides System basierend auf einer Pfadplanungsstrategie favorisiert, das zudem mittels Sensoren Hindernisse erkennt. Ein anderer Proband ergänzte, dass Rasenmäher-Roboter, die per Zufallsmuster operieren wenig ästhetische Ergebnisse liefern. Ein weiterer Teilnehmer fügte bei, dass sich die Eigentümer von Rasenmäher-Roboter oftmals einen perfekten Rasen, inkl. Muster, wie etwa bei einem Baseball-Feld wünschen und daher eine Pfadplanungsstrategie zu bevorzugen ist. Ein weiterer Kommentar führte, bezogen auf Pfadplanungsstrategien, folgendes aus: *"Husqvarna has shown that it was less than 20% more efficient. So, cost/efficiency ratio must be discussed."* In diesem Fall wäre es interessant zu wissen, welche Strategie getestet wurde.

Eine Unterfrage ermittelte diesbezüglich, wie viel Bedeutung die Probanden dem Mäh-Schema beimessen (siehe Abb. 14).

Bedeutung des zugrundeliegenden Mäh-Schemas

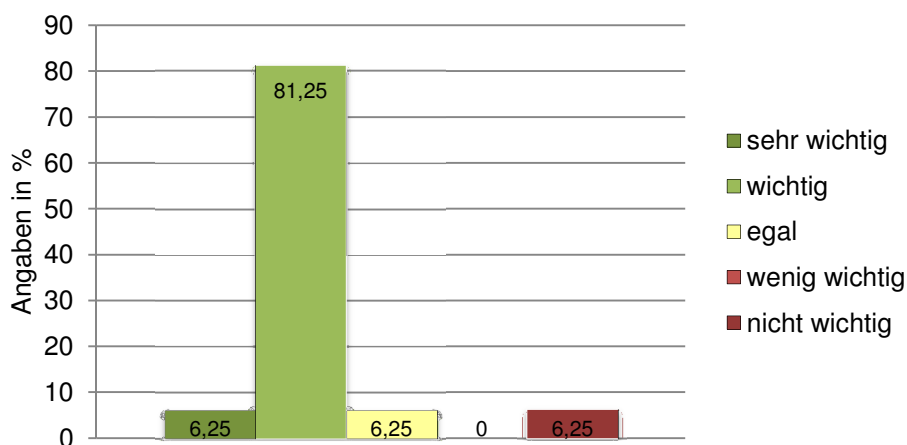


Abb. 14: Bedeutung des zugrundeliegenden Mäh-Schemas

Anhand des Ergebnisses kann gezeigt werden, dass für mehr als 80 % der Probanden das Mäh-Schema wichtig und für eine Person bzw. 6,25 %, sehr wichtig ist. Jeweils einer Person ist die Mähweise egal bzw. nicht wichtig.

In der nächsten Frage wurde die antreibende Energieform des Rasenmäher-Roboters hinterfragt (siehe Abb. 15). Folglich sind 25 % für nicht erneuerbare Energieformen, wie z.B. Gas- oder Benzinantriebssystemen. Ein Teilnehmer begründete diese Entscheidung damit, dass die Zuverlässigkeit ausschlaggebend ist und dass der Benzinverbrauch dieser Roboter in Vergleich zu anderen Anwendungen verschwindend gering sei. 56,25 % setzen hingegen auf erneuerbare Energieformen, wie z.B. Solarenergie. 18,75 % wählten "Sonstiges" und gaben jeweils in der Kommentarzeile an, dass Rasenmäher-Roboter mit elektrischem Strom von Batterien versorgt werden sollten.

Bevorzugte Energieform für Rasenmäher-Roboter

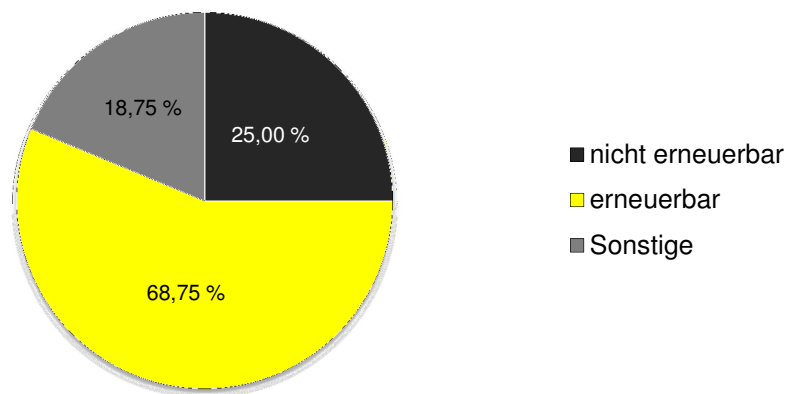


Abb. 15: Bevorzugte Energieform für Rasenmäher-Roboter

Bedeutung der verwendeten Energieform

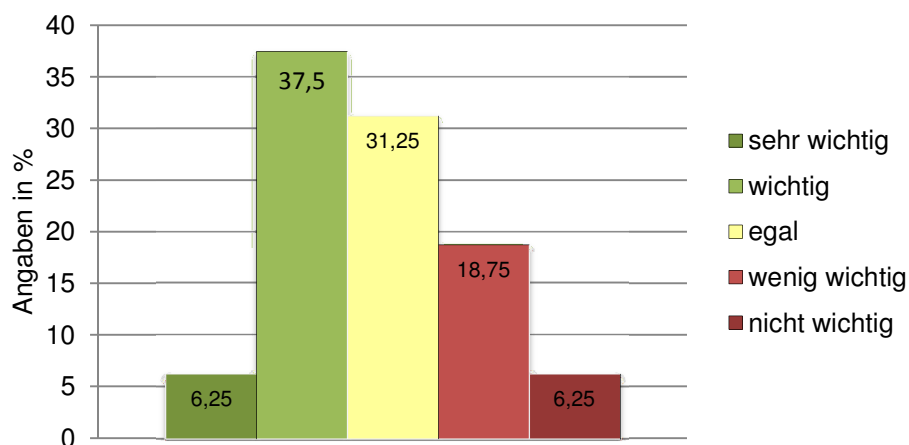


Abb. 16: Bedeutung der verwendeten Energieform

Abb. 16 visualisiert die Bedeutung der verwendeten Energieform. Anders als das zugrundeliegende Mähprinzip, scheint dieser Punkt nur eine untergeordnete Rolle zu spielen, da lediglich 6,25 % bzw. 37,50 % der Meinung sind, dass die verwendete Energieform sehr wichtig bzw. wichtig sei. Für 31,25 % der Befragten ist diese Frage egal und für 18,75 % bzw. 6,25 % wenig wichtig bzw. nicht wichtig.

Mit der nächsten Frage wurde die geometrische Genauigkeit, die ein Rasenmäher-Roboter idealerweise aufweisen sollte, thematisiert. Zur Beantwortung standen sechs Genauigkeitsklassen zur Verfügung, wobei lediglich drei Klassen ausgewählt wurden. Die Mehrheit (56,25 %) ist der Meinung, dass eine Genauigkeit unter einem Dezimeter vorliegen sollte. 25 % der Teilnehmer würden sich eine Subzentimeter-Genauigkeit wünschen und 18,75 % wären mit einer geometrischen Genauigkeit von 1 bis 5 Dezimeter zufrieden (siehe Abb. 17).

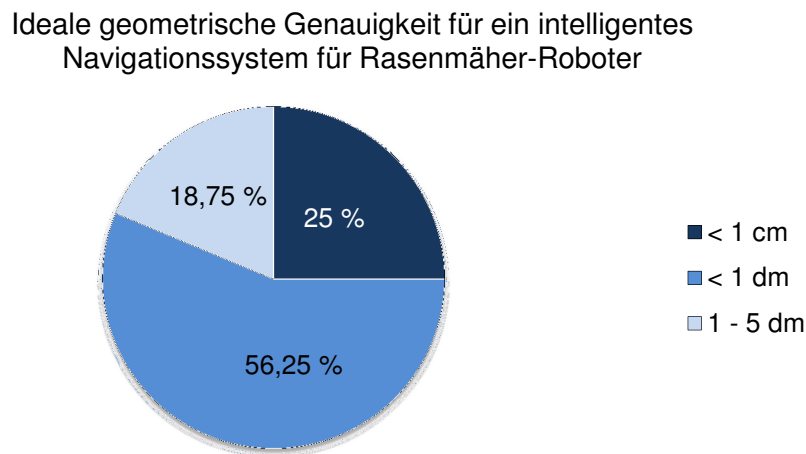


Abb. 17: Bevorzugte geometrische Genauigkeit für ein intelligentes Navigationssystem für Rasenmäher-Roboter

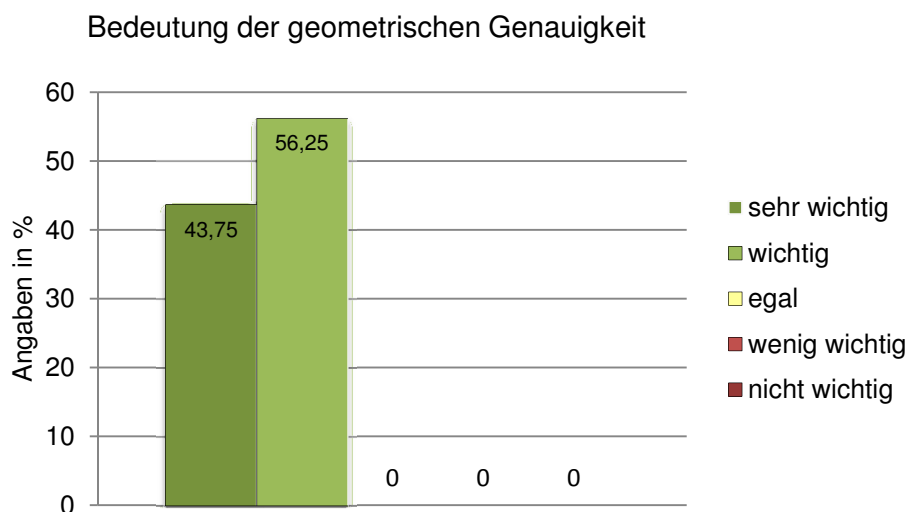


Abb. 18: Bedeutung der geometrischen Genauigkeit im Kontext von Rasenmäher-Roboter

Abb. 18 lässt erkennen, dass bezüglich der Bedeutung der geometrischen Genauigkeit, bezogen auf Rasenmäher-Roboter, weitestgehend ein Konsens vorliegt. Keiner der Probanden empfindet diesen Aspekt als wenig bzw. nicht wichtig. Stattdessen sind 43,75 % bzw. 56,25 % der Teilnehmer der Meinung, dass die Genauigkeit sehr wichtig bzw. wichtig ist.

Da sich im Zuge der Rechercharbeiten die zunehmende Bedeutung von Globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) in Bezug auf Rasenmäher-Roboter herauskristallisierte, wurde zunächst gefragt, ob die Probanden mit diesen Systemen vertraut sind (siehe Abb. 19).

Sind Ihnen Globale Navigationssatellitensysteme bekannt
(z.B. GPS oder GLONASS)?

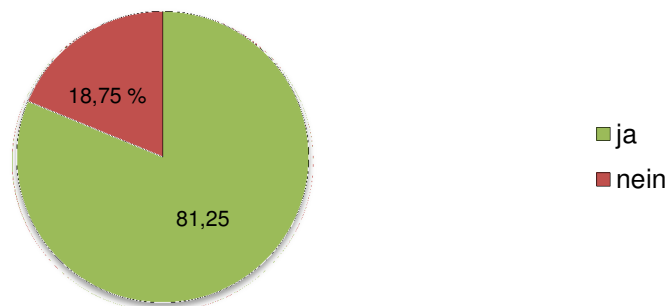


Abb. 19: Vertrautheit mit Globalen Navigationssatellitensystemen

Drei Teilnehmer (18,75 %) waren mit derartigen Systemen nicht vertraut und wurden somit von der nächsten Frage ausgeschlossen, die auf die Bewertung von GNSS, dGNSS und RTK-GNSS abzielte (siehe Abb. 20).

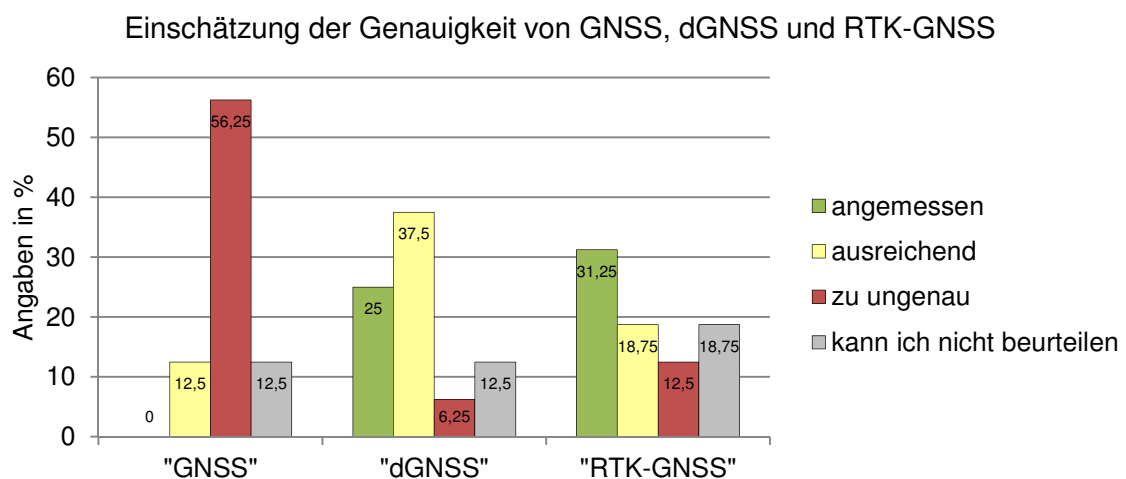


Abb. 20: Einschätzung der Genauigkeit von GNSS, dGNSS und RTK-GNSS

[Anm.: Die Prozentangaben in Abb. 20 beziehen sich auf die gesamte Stichprobe, weswegen die Gesamtheit von 100 % um 18,75 % abweicht, da drei Teilnehmer diese Frage nicht vorgesetzt bekamen.]

Nur ein Proband ist der Meinung, dass ein GNSS ohne Modifikation für die Navigationsaufgaben eines Rasenmäher-Roboters ausreichend ist. Zwei weitere konnten dazu keine Beurteilung abgeben. Die überwiegende Mehrheit (56,25 %) halten Systeme wie GPS oder GLONASS für zu ungenau.

Anders sieht das Ergebnis bei differentiellen GNSS (dGNSS) aus. 25 % bzw. 37,50 % der Umfrageteilnehmer halten ein solches System für angemessen bzw. ausreichend. Nur ein Teilnehmer stuft solche Systeme als zu ungenau ein und wiederum zwei weitere konnten dazu keine Angabe machen.

Bezüglich RTK-GNSS (Realtime Kinematic GNSS) befanden 31,25 % bzw. 18,75 % der Teilnehmer, solche Systeme für angemessen bzw. ausreichend. Für zwei Probanden ist diese Methode zu ungenau und drei weitere konnten diese nicht beurteilen. Das Ergebnis dieser Frage spiegelt sich im Wesentlichen in den Rechercheergebnissen wider.

In der nächsten Frage wurde die Einschätzung zur Genauigkeit einer weiteren möglichen Datenquelle, nämlich digitalisierte, großmaßstäbige Karten (z.B. M 1:1.000), zur absoluten Positionierung, hinterfragt (siehe Abb. 21).

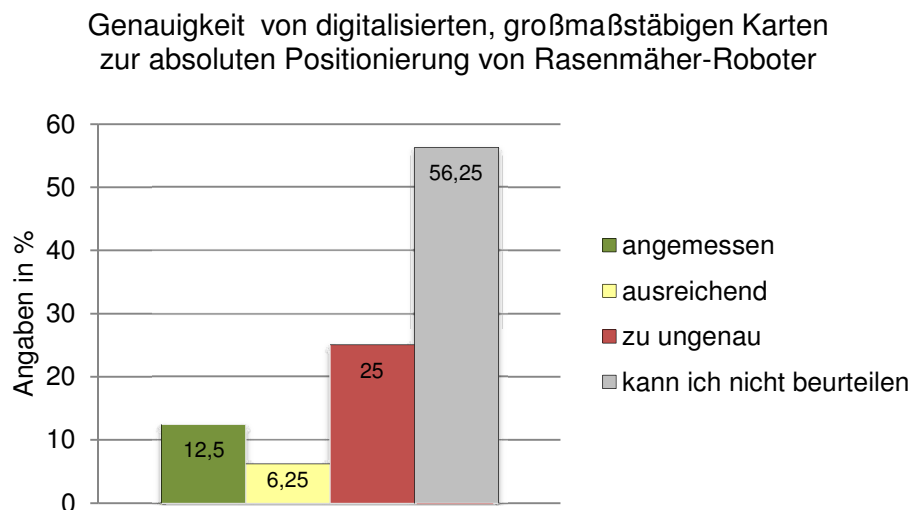


Abb. 21: Genauigkeit von digitalisierten, großmaßstäbigen Karten zur absoluten Positionierung von Rasenmäher-Roboter

Abb. 21 lässt erahnen, dass es sich bei dieser potenziellen Datenquelle wohl um eine sehr speziellen Informationsträger handelt, da die Mehrheit der Teilnehmer (56,25 %) diesen hinsichtlich seiner Genauigkeit nicht beurteilen konnte. Für 25 % der Probanden sind z.B. Katasterkarten im Maßstab 1:1.000 für die Zwecke eines Rasenmäher-Roboters

zu ungenau. Lediglich eine Person findet deren Genauigkeit hingegen ausreichend und zwei Teilnehmer befinden diese für angemessen.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Frage nach der Genauigkeitseinschätzung von Daten, basierend auf terrestrischer Datenerfassung, z.B. mittels Theodoliten (siehe Abb. 22). Auch hier zeichnet sich ein hoher Grad an Unwissenheit bezüglich dieser Methode ab. So kann die Mehrheit der Partizipierenden (61,25 %) keine Genauigkeitsbeurteilung abgeben. Eine Person befindet diese Variante als ausreichend und immerhin 31,25 % als angemessen.

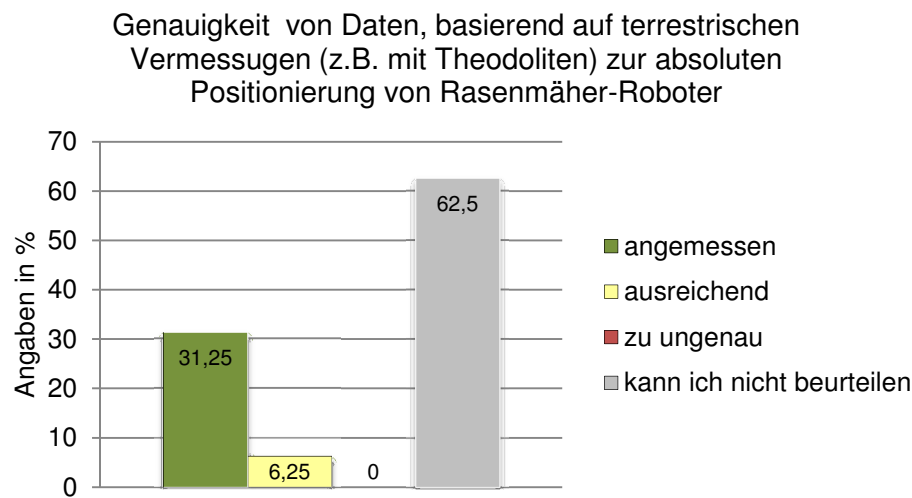


Abb. 22: Genauigkeitseinschätzung von Daten, basierend auf terrestrischen Vermessungen (z.B. mit Theodoliten) zur absoluten Positionierung von Rasenmäher Roboter

Ein Vergleich der beiden letzten Fragen zeigt, dass sämtliche Teilnehmer, die die Genauigkeit digitalisierter, großmaßstäbiger Karten nicht beurteilen konnten, auch Theodolitendaten zur absoluten Positionierung von Rasenmäher-Roboter nicht einschätzen konnten. Tatsächlich sind dem Autor auch keine wissenschaftlichen Beiträge oder Prototypen bekannt, die auf diese Datenquellen zurückgreifen. Es könnte sich daher um einen, so weit bekannt, neuartigen Ansatz handeln.

Der nächste Punkt hinterfragt, welche dieser drei großen Methodengruppen, unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Aspektes, bevorzugt werden würden. Das Ergebnis ist in Abb. 23 dargestellt und löst auf den ersten Blick Verwunderung aus. Immerhin konnten jeweils deutlich mehr als die Hälfte der Probanden die Genauigkeit von digitalisierten Karten und Daten eines Theodolits nicht einschätzen. Dennoch gibt genau ein Viertel der Teilnehmer an, digitalisierte Karten zu bevorzugen. Und immerhin 18,75 % würden Theodoliten verwenden. Obwohl die Mehrheit der Teilnehmer mit 56,25 % GNSS vorziehen würde, ist das Ergebnis dieser Frage somit nur mit Vorsicht zu genießen und zu interpretieren.

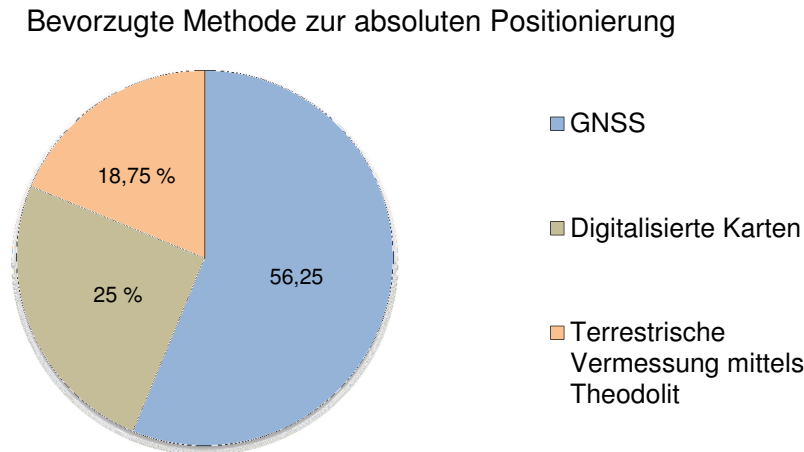


Abb. 23: Bevorzugte Methode zur absoluten Positionierung

Um zusätzliche Informationen zu weiteren potenziellen Methoden zu erhalten, wurde diesbezüglich eine offene Frage gestellt, die auch von sieben Teilnehmern beantwortet wurde. So erwähnten zwei Probanden die Möglichkeit einer SLAM (Simultaneous Location and Mapping)-Methode zur absoluten Positionierung. Dabei wird lediglich die absolute Position des Rasenmäher-Roboters zu Beginn des Arbeitsprozesses benötigt. Während der Fahrt erfolgt die Navigation über kostengünstige, sichtbasierte Systeme. Diese werden in Kapitel 7.2 genauer behandelt.

Eine weitere vorgeschlagene Methode ist die Triangulation mittels RFID (Radio-frequency identification). Dabei handelt es sich um Distanzmessungen von drei bekannten Punkten zu einem bestimmten Objekt mittels Funkwellen.

Die Verwendung einer Funkbake, die im Zentrum eines lokalen Koordinatensystems platziert ist, schlägt ein anderer Proband vor. Anschließend muss der Rasenmäher-Roboter, der mit GNSS ausgerüstet ist, an die Ecken der zu mähenden Fläche transportiert werden, wo die x- und y-Koordinaten aufgenommen werden. Die Koordinaten dieser Punkte sollen anschließend zur Kartengenerierung eingesetzt werden.

Ein weiterer Teilnehmer fügt hinzu, dass aktuell viele Studien über lokale Positionierungssysteme mittels WLAN-Hotspots für den Indoor-Bereich durchgeführt werden, die jedoch ebenfalls zu ungenau für Rasenmäher-Roboter sind.

Ähnliche Ansätze favorisiert ein anderer Teilnehmer, nämlich auf Radiowellen basierende und sichtbasierte Systeme. Abschließend hält ein weiterer Proband fest: *"The best solution so far for path planning is the differential GPS"*.

Viele Artikel, die im Zuge der Literaturrecherche über Rasenmäher-Roboter analysiert wurden, stellen Prototypen vor, die mit einer inertialen Messeinheit (IMU - en. Inertial Measure Unit) bestückt sind. Ob ein solcher Einsatz von den Probanden als sinnvoll betrachtet wird, wurde mit der nächsten Frage überprüft (siehe Abb. 24).

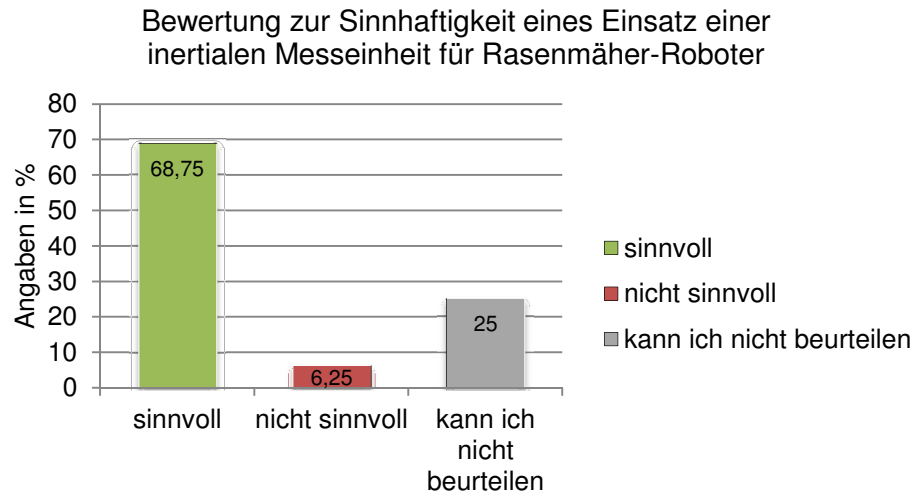


Abb. 24: Bewertung der Sinnhaftigkeit eines Einsatzes einer inertialen Messeinheit für Rasenmäher-Roboter

Folglich halten knapp mehr als zwei Drittel der Teilnehmer (68,75 %) den Einsatz einer inertialen Messeinheit für sinnvoll. Lediglich eine Person bzw. 6,25 % ist vom Gegenteil überzeugt. Ein Viertel der Befragten konnte einen möglichen Einsatz nicht beurteilen. Drei Personen gaben zudem einen Kommentar ab. Ein Teilnehmer wies darauf hin, dass eine Messmethode meist nicht ausreichend sei und somit die Verwendung von weiteren Sensoren, wie jene einer inertialen Messeinheit, hilfreich sein könnte. Ein anderer Proband verwies hingegen auf die kumulierten Fehler einer inertialen Messeinheit. Zudem seien derartige Systeme sehr teuer und erst ab 10.000 \$ zuverlässig. Außerdem würde, laut einem weiteren Befragten, eine Aktualisierung lokaler Hotspots benötigt werden.

Die nachfolgende Frage zielt darauf ab, herauszufinden, ob die Probanden mit dem Begriff SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) vertraut sind. Für gut zwei Drittel der Stichprobe (68,75 %) trifft dies zu (siehe Abb. 25).

Ist Ihnen der Begriff SLAM geläufig?

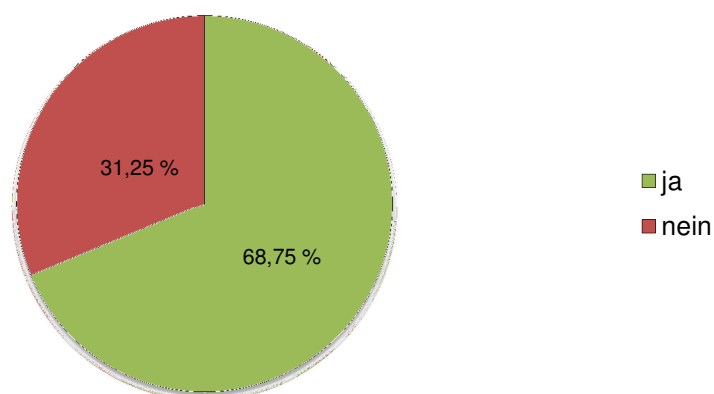


Abb. 25: Vertrautheit mit dem Begriff "SLAM"

In weitere Folge wurden jene Personen (68,75 %), die angaben, mit dem Begriff SLAM vertraut zu sein, gefragt, für wie sinnvoll sie den Einsatz von SLAM-Technologien in Bezug auf Rasenmäher-Roboter erachten (siehe Abb. 26).

[Anm.: Die prozentuellen Angaben in Abb. 26 beziehen sich auf die gesamte Stichprobengröße.]

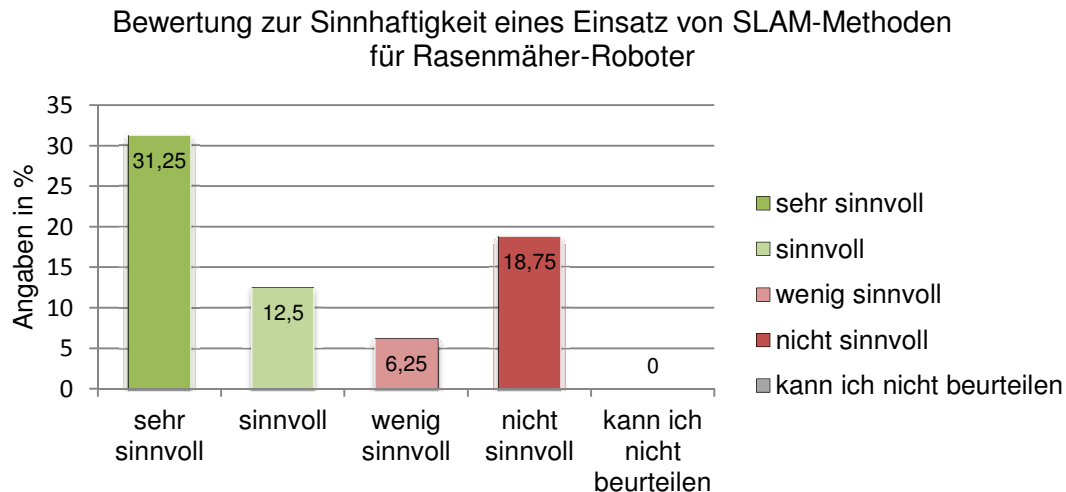


Abb. 26: Bewertung der Sinnhaftigkeit eines Einsatzes von SLAM-Methoden für Rasenmäher-Roboter

Gut ein Drittel der Befragten (31,25 %) gab an, dass die Verwendung von SLAM-Methoden sehr sinnvoll sei. Einen möglichen Einsatz halten immerhin 12,5 % für sinnvoll. Hingegen sehen 6,25 % bzw. 18,75 % der Teilnehmer keinen Vorteil darin und beantworteten die gestellte Frage mit wenig bzw. nicht sinnvoll.

Die nächste Frage bezieht sich auf Alternativmethoden zur Begrenzung der zu mähenden Fläche, wobei zwei Varianten vorgegeben wurden (siehe Abb. 27).

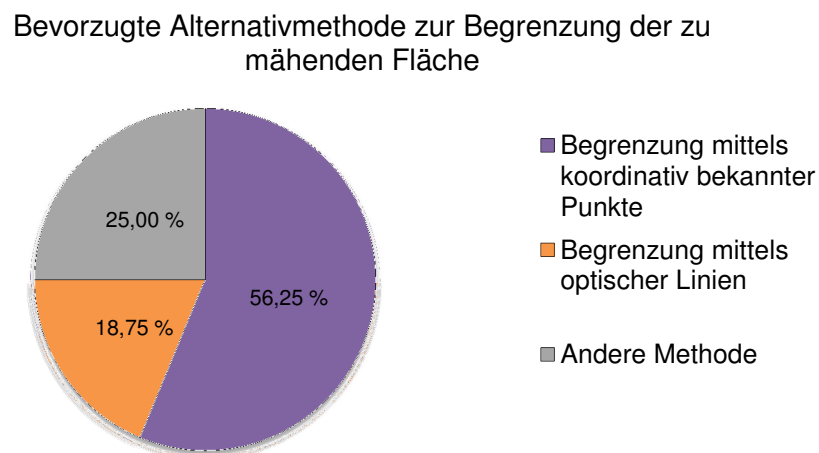


Abb. 27: Bevorzugte Alternativmethode zur Begrenzung der zu mähenden Fläche

Die Mehrheit der Teilnehmer (56,25 %) würden eine Begrenzungsmethode mittels koordinativ bekannter Punkte bevorzugen, 18,75 % hingegen eine Variante mittels optischer Linien, z.B. in Form von aufgetragenen Kalklinien. Ein Viertel der Befragten würde eine andere Methode vorziehen. Um diese zu ermitteln, wurde die Gelegenheit einen Kommentar abzugeben ermöglicht, die durch drei Probanden wahrgenommen wurde.

Ein Teilnehmer stellt die Verwendung einer unterbrochenen Graslinie zur Begrenzung in Aussicht. Zwei weitere verweisen auf Landmarken, die mittels SLAM-Methoden identifiziert werden können. Ein anderer Teilnehmer merkt kritisch an, dass solange keine Subzentimeter Genauigkeit gewährleistet werden kann, eine andere Methode als jene unter Verwendung von Induktionsschleifen nicht zielführend sein kann. Ein weiterer Kommentar bezieht sich auf die Methode mit Hilfe optischer Linien. Dabei wurde angemerkt, dass die Grenzziehung mittels Koordinaten zwar für die meisten Fälle erfolgsversprechend sei, aber im Falle von Hindernissen auf optische Linien zurückgegriffen werden sollte, da sich diese dynamisch verhalten können.

Die nächsten beiden Fragen bezogen sich auf die Einschätzung von zwei alternativen Navigationsweisen, zum einen mittels vordefinierten Wegpunkten, so genannte "way points" (siehe Abb. 28) und zum anderen Methoden der Koppelnavigation (siehe Abb. 29). Hinsichtlich der ersten Variante konnten zwei Personen bzw. 12,5 % kein Urteil abgeben. Die große Mehrheit ist der Meinung, dass ein derartiges System effizient (43,75 %) oder zumindest ausreichend (31,24 %) sei. Lediglich 12,5 %, waren der Meinung, dass die Navigation mittels Wegpunkte ineffizient ist.

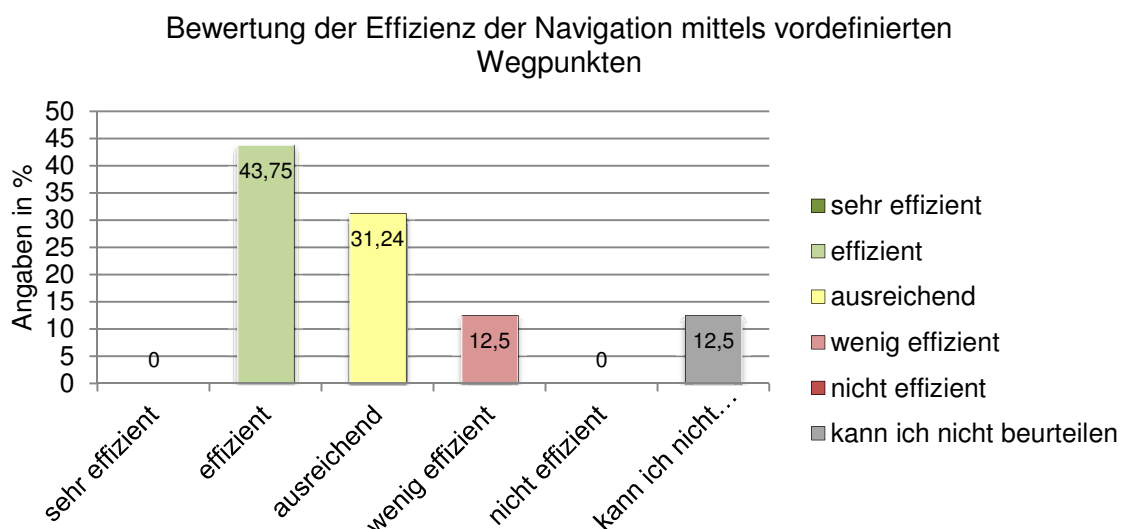


Abb. 28: Bewertung der Effizienz der Navigation mittels vordefinierten Wegpunkten

Bei Betrachtung des Ergebnisses der zweiten vorgeschlagenen Variante, mittels Koppelnavigation, zeigt sich ein größerer Unsicherheitsfaktor, da ein Viertel der Teilnehmer

diese Methode nicht bewerten konnten. Zudem liegt hier die Mehrheit bei den Skeptikern. 18,75 % bzw. 31,25 % sind der Meinung, dass diese Systeme wenig bzw. nicht effizient sind. Für wiederum 18,75 % sind sie ausreichend und bloß für eine Person effizient.

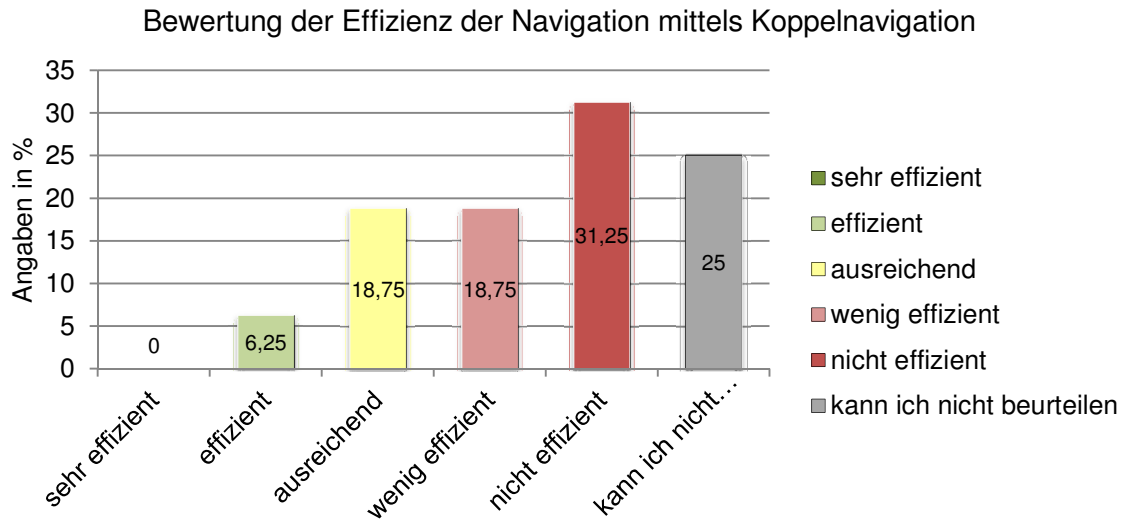


Abb. 29: Bewertung der Effizienz der Navigation mittels Koppelnavigation

Im direkten Vergleich dieser beiden vorgelegten Navigationsweisen ist die Methode mit Hilfe von way points scheinbar überlegen und damit zu bevorzugen. Ob dies tatsächlich zutrifft wird im Kapitel 8 untersucht.

Einige Prototypen, die während der Literaturrecherche unter die Lupe genommen wurden, sind mit einem Graphical User Interface (GUI) ausgestattet. Dieses ermöglicht dem Besitzer unterschiedliche Anweisungen, wie z.B. Grashöhe, Zeitraum des Mähens, usw. zu programmieren. Die folgende Frage diente dazu herauszufinden, ob die Probanden die Verwendung eines Graphical User Interfaces befürworten oder nicht.

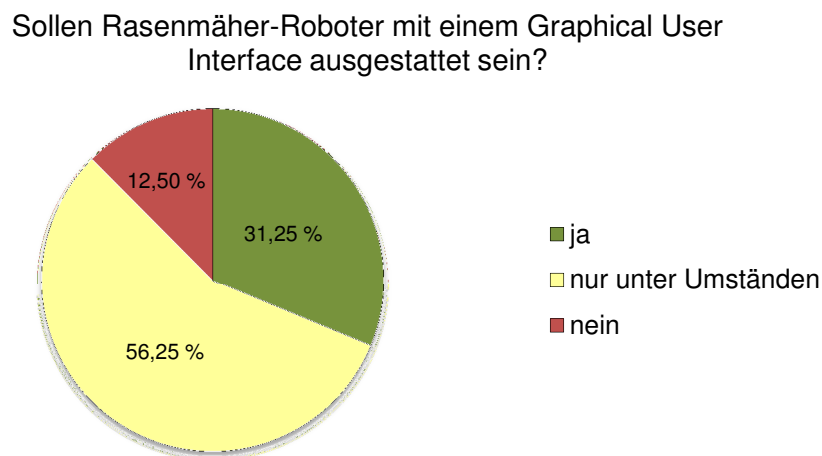


Abb. 30: Ergebnis der Befragung über den Einsatz eines Graphical User Interfaces bei Rasenmäher-Roboter

12,50 % bzw. absolut zwei Personen beantworteten die Frage mit einem klaren Nein. Hingegen sprach sich gut ein Drittel der Teilnehmer für den Einsatz einer graphischen Nutzerschnittstelle aus. Die Mehrheit (56,25 %) befürwortet grundsätzlich eine mögliche Verwendung, stellen dabei jedoch Bedingungen (siehe Abb. 30). Die Frage erlaubte zusätzlich einen Kommentar abzugeben. Zwei Probanden waren der Meinung, dass die Verwendung eines Graphical User Interface vom Detailgrad abhängig sei und wie der Roboter auf Hindernisse reagiere. Ein weiterer Teilnehmer befürwortete zwar den Einsatz eines GUI, merkte jedoch kritisch an, dass Rasenmäher-Roboter idealerweise selbstständig ohne einen zusätzlichen menschlichen Input ihre Arbeit erledigen sollten. Der letzte Kommentar brachte es treffend auf den Punkt, da die Verwendung einer solchen Schnittstelle vom jeweiligen Roboter-System abhängig ist. Unter der Annahme, dass der Roboter mittels vordefinierter Wegpunkte die Rasenfläche mäht, sei es sicherlich sinnvoll ein GUI zu verwenden, für den Fall, dass in Zukunft weitere Hindernisse (z.B. Blumenbeete) im Garten angelegt werden.

Zur Objekt- bzw. Hindernisdetektion gibt es zwei große Methodengruppen. Zum einen ist es möglich, rund um das Objekt (z.B. Swimming Pool oder Blumenbeet) eine Induktionsschleife zu vergraben. Zum anderen kann ein Rasenmäher-Roboter auch mit entsprechenden Sensoren zur dynamischen Objektdetektion ausgerüstet sein. In der nächsten Frage wurde ermittelt, welches System die Probanden bevorzugen würden.

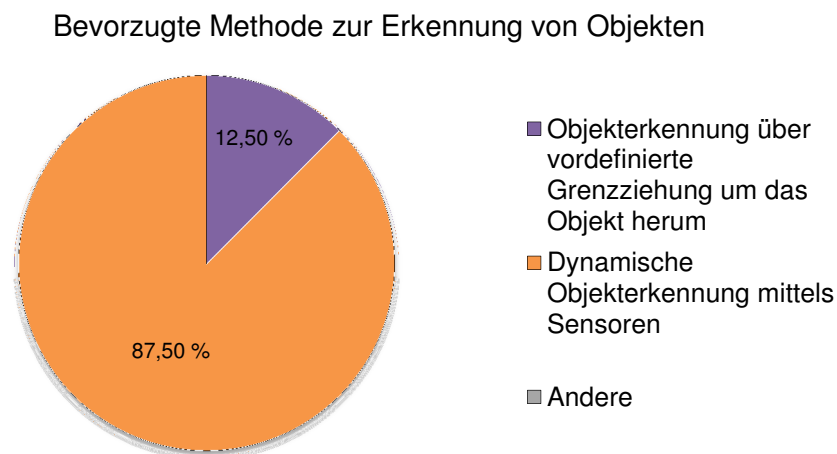


Abb. 31: Bevorzugte Methode zur Erkennung von Objekten

Das Ergebnis dieser Frage lieferte das erwartete Ergebnis. Eine große Mehrheit der Teilnehmer (87,50 %) würde eine dynamische Objekterkennung mittels Sensoren bevorzugen (siehe Abb. 31). Zusätzlich wurde erneut die Möglichkeit geboten, diesbezüglich einen Kommentar abzugeben. Ein Proband fügte hinzu, dass dynamische Methoden besser geeignet sind und ein weiterer merkte dazu an, dass Objekte nicht nur statisch, son-

dern auch dynamisch seien und deshalb eine dynamische Objekterkennung eingesetzt werden muss. Laser- oder sichtbasierte Methoden würde ein weiterer Teilnehmer empfehlen. Berührungssensoren, so genannte "Bumpers", würden hingegen für die Erkennung von Zäunen ausreichen. Der letzte Kommentator brachte es erneut, wie auch schon bei der vorherigen Frage, auf den Punkt. Er betonte abermals, dass die Wahl der Sensoren vom jeweiligen System und vom Anwendungsfall abhängig ist. Massenprodukte müssen für unterschiedliche Umgebungen ausgerichtet sein, weswegen Methoden der dynamischen Objekterkennung bevorzugt werden sollten. Ultraschall- und Infrarotsensoren seien nach der Meinung dieses Probanden unbedingt zu vernachlässigen, da sie zu wenig robust gegen äußere Einflüsse seien. Laserscan-Technologie sei dafür wesentlich besser geeignet. Da es sich dabei jedoch um aktive Systeme handelt, das bedeutet, dass Laserstrahlen sowohl ausgesendet, als auch empfangen werden, sind diese große Energieverbraucher, weswegen auf passive Systeme zurückgegriffen werden sollte. Bezüglich Berührungssensoren wurde angemerkt, dass diese sehr empfindlich sein müssten, wobei die Gefahr besteht, dass starke Winde u.dgl. zu Fehler führen könnten.

Um Aussagen über die Effizienz von unterschiedlichen Methoden zur Objektdetektion zu erhalten, wurde die Einstellung darüber hinterfragt. Das Ergebnis ist in Abb. 32 graphisch dargestellt.

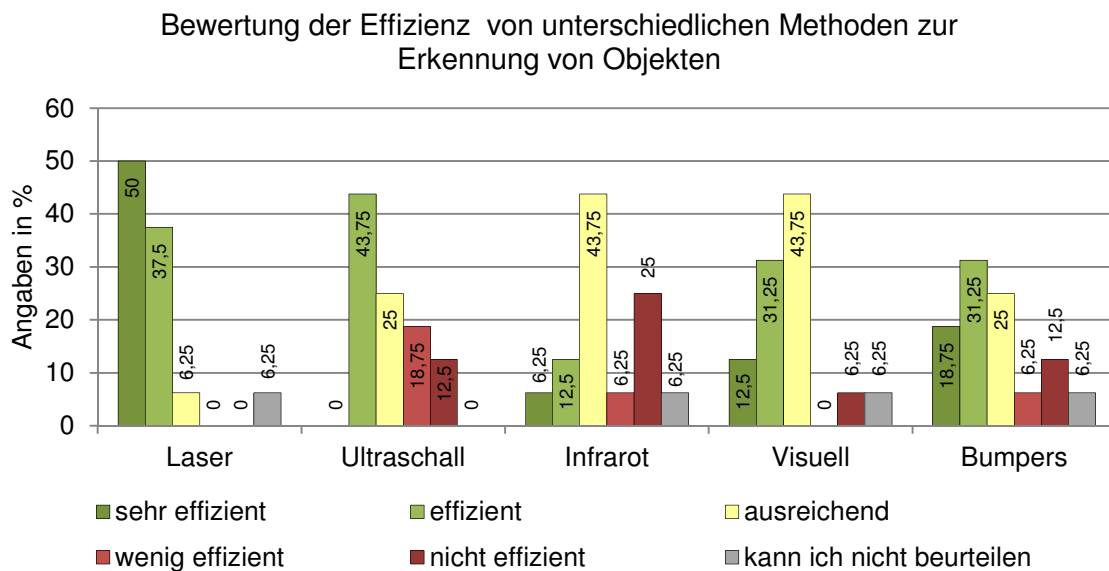


Abb. 32: Bewertung der Effizienz von unterschiedlichen Methoden zur Erkennung von Objekten

Bei Betrachtung des Säulendiagramms ist zu erkennen, dass im Vergleich Laserscan-Methoden die Gewinner dieser Kategorie sind. Eine klare Mehrheit befindet diese Technologie zur Objekterkennung als effizient (37,50 %) bzw. sehr effizient (50%). Damit wurde auch die teuerste Technologie zur besten gewählt. Die weitere Reihenfolge lautet Visuelle

Systeme, Berührungssensoren, Ultraschallsensoren und Infrarotsysteme. An dieser Stelle ist das PreisLeistungsverhältnis jedoch zu berücksichtigen. Die Preisspanne zwischen laser- und sichtbasierten Systemen beträgt mehrere tausend Euro.

Die Kostenfrage ist eine nicht unwesentliche und zum Teil auch die entscheidende Frage für den Erfolg eines Rasenmäher-Roboters. Die Anzahl und die Wahl der Sensoren schlagen sich unmittelbar auf den Verkaufspreis nieder. Die aktuelle Preisspanne liegt bei Rasenmäher-Roboter in etwa zwischen 1.000 Euro und 5.000 Euro, in Abhängigkeit von der möglichen Größe der Rasenfläche, der Produktmarke und der Fertigung. Werden hingegen die Prototypen der ION Robotic Lawn Mower Competition betrachtet, so liegt die Preisspanne zwischen 1.000 Euro und 40.000 Euro. Hierbei muss erwähnt werden, dass es sich dabei um keine Massenprodukte handelt, was einen deutlich höheren Produktionspreis verursacht. Dennoch würde sich die Verwendung von unterschiedlichen Sensoren und Technologien auf dem Massenmarkt deutlich erkennbar machen.

Aus diesem Grund wurden die Probanden gefragt, wie viel ihnen ein intelligenter Rasenmäher-Roboter wert wäre (siehe Abb. 33). Als intelligent kann ein Rasenmäher-Roboter dann angesehen werden, wenn dieser mit Hilfe entsprechender Sensoren in der Lage ist, sich selbstständig in einer begrenzten, bekannten oder unbekannten Umgebung kollisionsfrei zu bewegen und währenddessen die Rasenfläche nach einer festgelegten Systematik, in kürzester Zeit, abmäht. Dabei ist es unter anderem erforderlich, statische und dynamische Hindernisse rechtzeitig zu erkennen und dementsprechend den Navigationspfad zu aktualisieren.

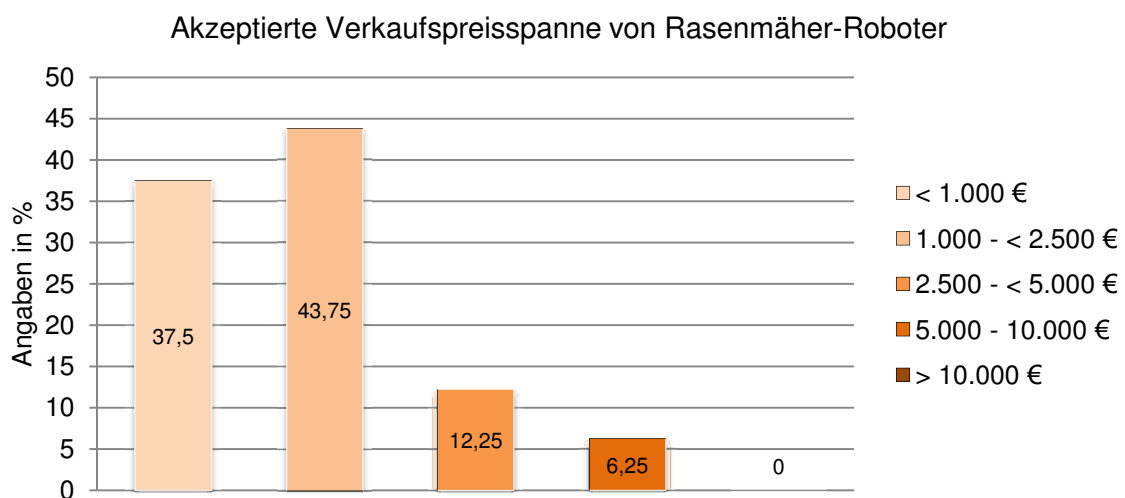


Abb. 33: Akzeptierte Verkaufspreisspanne von Rasenmäher-Roboter

Es ist verständlich, dass niemand viel Geld ausgeben möchte. Dahingehend werden auch die 37,5 % der Teilnehmer interpretiert, die einen Rasenmäher-Roboter für weniger

als 1.000 Euro kaufen würden. Ein derart niedriger Verkaufspreis ist wohl in den kommenden Jahren nicht zu erwarten. 43,75 % der Befragten wären bereit, bis zu 2.500 Euro für ein entsprechend intelligentes Mähsystem auszugeben. Absolut zwei Teilnehmer bzw. eine Person würden sogar Preise bis zu 5.000 Euro bzw. bis zu 10.000 Euro akzeptieren. Darüber würde sich hingegen wohl kein Käufer mehr finden.

Die nächste Frage wurde offen gestellt und bot den Probanden die Möglichkeit ihre Erwartungen von einem so genannten intelligenten Rasenmäher-Roboter kund zu tun. Zehn der 16 Teilnehmer nahmen diese Gelegenheit wahr. Eine Person hielt kurz und knapp fest: *"I make my own."* Ein für den jeweiligen Besitzer abgestimmtes Modell wäre klarerweise die beste Lösung, scheitert jedoch an vielen Dingen, die an dieser Stelle nicht extra ausgeführt werden müssen.

Für die meisten ist es, neben der grundlegenden Sicherheit und Effektivität sowie der zweckmäßigen Arbeitsweise, wichtig, dass der Rasen ein entsprechend gepflegtes Aussehen hat. Rasenmäher-Roboter sollten demnach auch bestimmte Muster in den Rasen mähen können. Dabei ist vor allem die Eigenständigkeit des Roboters von besonderer Bedeutung. Es ist zwar eine gewisse Bereitschaft auszumachen, Zeit für die Installation zu investieren, im Zuge derer z.B. die Grenzen über ein Graphical User Interface vordefiniert werden. Danach sollte der Roboter jedoch in der Lage sein, seine Aufgaben vollautomatisch und in einer angemessenen Qualität zu erledigen. Ein weiterer wichtiger Punkt scheint eine reibungslose Objekterkennung von sowohl statischen, als auch dynamischen Objekten zu sein. Da die Größe des Roboters, aufgrund der Verbauung, größer als sein Mähradius ist, wird zusätzlich eine Trimmvorrichtung gewünscht, die entlang von Hindernissen das Gras bis zu dessen Grenze kürzt. Ein weiterer Teilnehmer würde sich wünschen, dass Rasenmäher-Roboter auch Gehwege als solche erkennen sowie passieren, um den Rasen auf der anderen Seite weiter mähen zu können. Ein anderer schlägt ein hybrides System vor, das nicht nur den Rasen mäht, sondern auch in der Lage ist, das Falllaub im Herbst aufzusaugen.

Ein weiterer Befragter nutzte diese Kommentarmöglichkeit zu einer allgemeinen Aussage und hielt fest, dass das grundlegende Problem in der Zuverlässigkeit liegt. Hinzu kommt eine kritische Äußerung über die Sinnhaftigkeit von weltweiten Wettbewerben zum Thema "Autonome Navigation", da die Teilnehmer meist Studenten seien und entsprechende universitäre Fördermittel zur Verfügung haben, wodurch, nach Meinung dieses Probanden, drei wesentliche Hindernisse entstehen, die eine Kommerzialisierung dieser Prototypen maßgeblich verhindert. Der erste Problempunkt sind die Kosten dieser Prototypen. Ein Thema, das zuvor bereits kurz angerissen wurde. Der zweite Punkt ist, dass die meisten Endanwender keine Wissenschaftler oder Ingenieure sind, wobei dieser Teilnehmer der Meinung ist, dass "Einfache Leute" keine komplexen Systeme erlernen

wollen, sondern sich ein einfaches und intuitiv zu bedienendes Gerät wünschen. Der dritte und letzte Punkt sei, nach Einschätzung des Befragten, die Tatsache, dass niemand bereit ist, mehrere tausend Dollar für ein neues Gerät auszugeben und daher an Erweiterungen für herkömmliche Rasenmäher gearbeitet werden sollte. Diese Ansätze, die nicht genauer erläutert wurden, würden den Gesamtpreis des Rasenmähers senken, müssten jedoch so einfach wie möglich konzipiert sein, dass diese vom Endanwender selbst installiert werden könnten.

Hinter dem letzten Kommentar befinden sich interessante Gedanken. Derartige verallgemeinernde Aussagen müssten jedoch einer wissenschaftlichen Untersuchung unterzogen werden, was im Rahmen dieser Masterarbeit jedoch nicht möglich und beabsichtigt ist.

In der nächsten Frage wurden sechs Kriterien von Rasenmäher-Robotern aufgelistet. Die Probanden wurden aufgefordert diese zu bewerten (siehe Abb. 34).

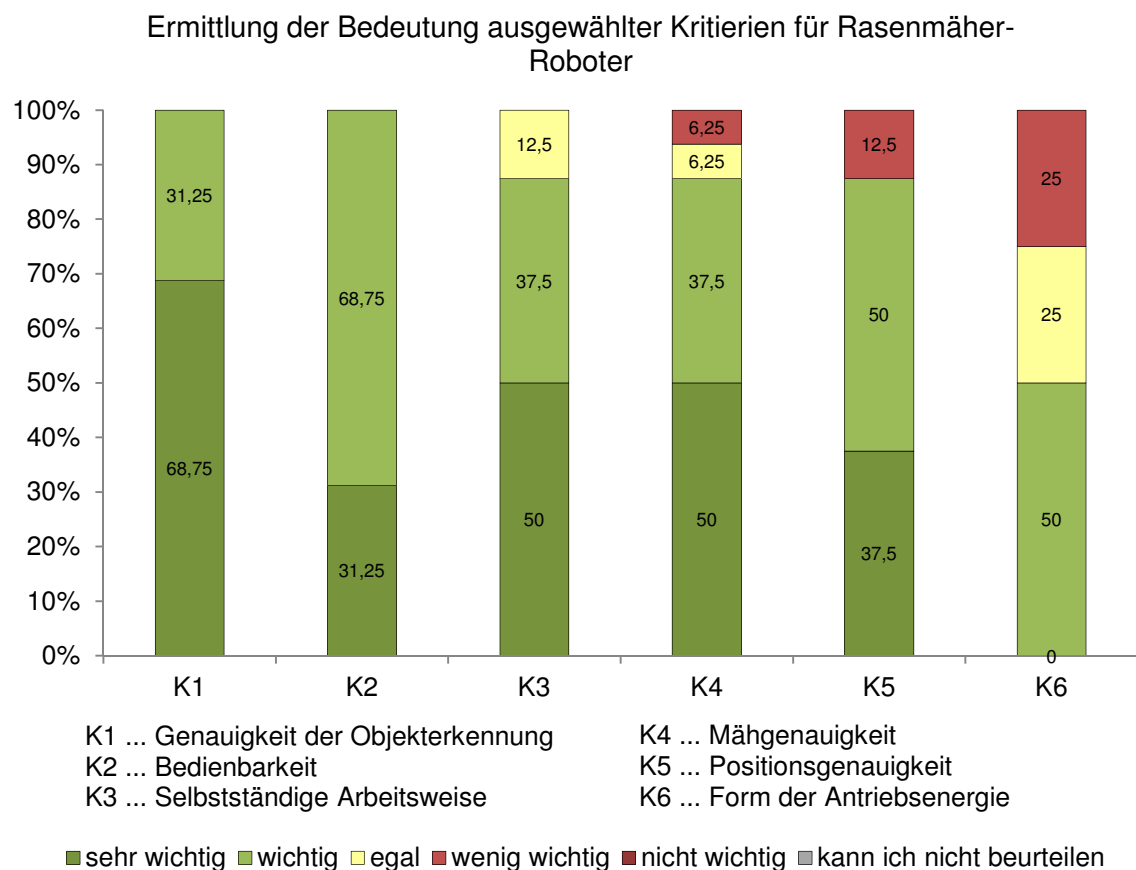


Abb. 34: Ermittlung der Bedeutung ausgewählter Kriterien für Rasenmäher-Roboter

Keines der sechs ausgewählten Kriterien wurde als nicht wichtig betrachtet. Als wenig wichtig betrachteten 12,50 % die Positionsgenauigkeit, 25 % die Form der Antriebsenergie und 6,25 % die Mähgenauigkeit. Die letzten zwei Kategorien wurden bereits in vorange-

gangen Fragen auf Ihre Bedeutung hin untersucht (siehe Abb. 16 und Abb. 18). Im direkten Vergleich kommt es zu geringfügigen Abweichungen. Die Form der Antriebsenergie scheint nur eine untergeordnete Rolle einzunehmen. Die größte Bedeutung kommt der Genauigkeit der Objekterkennung und der Bedienbarkeit zu. Die Mähgenauigkeit und die selbstständige Arbeitsweise nehmen zwar eine bedeutende Rolle ein, jedoch nicht im erwarteten Ausmaß, da besonders die Wichtigkeit dieser beiden Kriterien oftmals, seitens der Probanden, hervorgehoben wurde.

Die abschließende Frage der Basisversion des zweiten Themenblocks richtete sich nach den Erwartungen der Probanden, ob intelligente Rasenmäher-Roboter in absehbarer Zukunft Marktreife erlangen können (siehe Abb. 35).

Können intelligente Rasenmäher-Roboter in absehbarer Zukunft Marktreife erlangen?

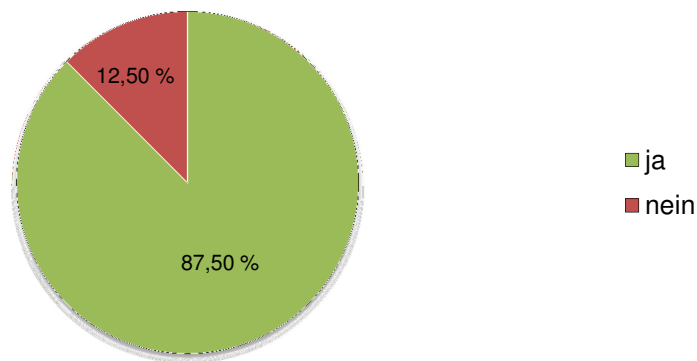


Abb. 35: Können intelligente Rasenmäher-Roboter in absehbarer Zukunft Marktreife erlangen?

Eine große Mehrheit der Befragten (87,50 %) beantwortete diese Frage mit Ja, lediglich zwei hingegen mit Nein. Diese positive Grundeinschätzung kann als Aufforderung an den Bereich Forschung und Entwicklung von Rasenmäher-Roboter angesehen werden.

Die beiden Teilnehmer der dritten Probandengruppe "Vermarktung und Verkauf" wurden zusätzlich gefragt, ob es eventuell Kundenwünsche gibt. Beide verneinten. Mit lediglich zwei Antworten kann dieses Ergebnis nicht als repräsentativ betrachtet werden. Dennoch wären diesbezügliche Antworten interessant gewesen.

Der dritte und abschließende Teil des Fragebogens setzte sich aus drei soziodemographischen Fragen zum Geschlecht, Geburtsjahr und höchste abgeschlossene Schulbildung zusammen. Nur ein Teilnehmer wollte diese drei Fragen nicht beantworten. Die restlichen Probanden waren ausschließlich männlich, wovon 14 einen Hochschul- bzw. Universitätsabschluss aufweisen konnten. Eine Person schloss eine Fachschule mit Matura ab. Die Jahrgangsspanne beträgt 1949 bis 1990. Davon wurden drei Teilnehmer vor 1960, vier im Zeitraum zwischen 1960 und 1980 und neun ab 1980 geboren.

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse der Online-Umfrage im Detail, Frage für Frage präsentiert und interpretiert, wobei die Rahmenbedingungen im Hinterkopf behalten werden müssen. Trotz der durchschnittlichen Rücklaufquote sind, aufgrund der relativ kleinen Stichprobe, Interpretationen und vor allem verallgemeinernde Aussagen mit besonderer Vorsicht zu genießen, da die Objektivität leicht verloren gehen könnte. Im Folgenden Kapitel werden die Ergebnisse des Fragebogens zusammenfassend präsentiert, wobei versucht wird, Anforderungen an intelligente Rasenmäher-Roboter zu extrahieren und aufzulisten.

6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Auswertung

Dieses Kapitel verfolgt das Ziel anhand der Fragebogenauswertung (siehe Kapitel 6.2), die erste Forschungsfrage zu beantworten. Es wird versucht, einen Bereichskatalog für Rasenmäher-Roboter aufzustellen. Dieser soll zum Ende dieser Masterarbeit (siehe Kapitel 9) den gegenwärtigen technologischen Möglichkeiten gegenübergestellt werden, um herauszufinden, ob heutzutage ein "ideales", intelligentes Rasenmäher-Roboter System realisierbar ist.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Online-Umfrage ist in Abb. 37 auf der nächsten Seite graphisch dargestellt. Im Zuge der Auswertung wurden neun Bereiche von Rasenmäher-Roboter extrahiert und anschließend auf ihre Bedeutung hin bewertet (siehe Abb. 36).

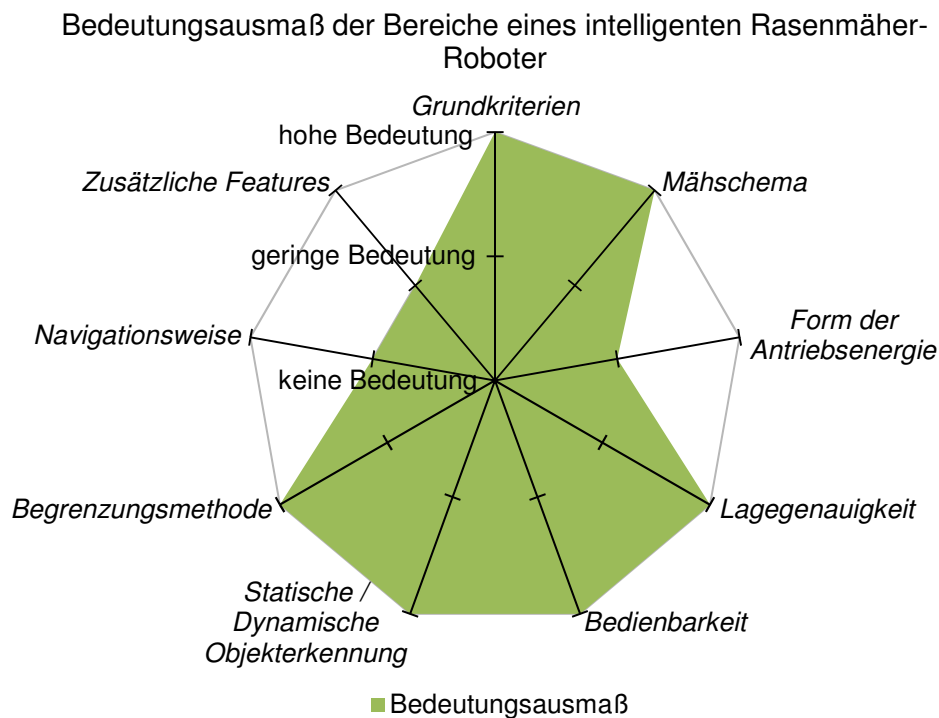


Abb. 36: Bedeutungsausmaß der Bereiche eines intelligenten Rasenmäher-Roboters

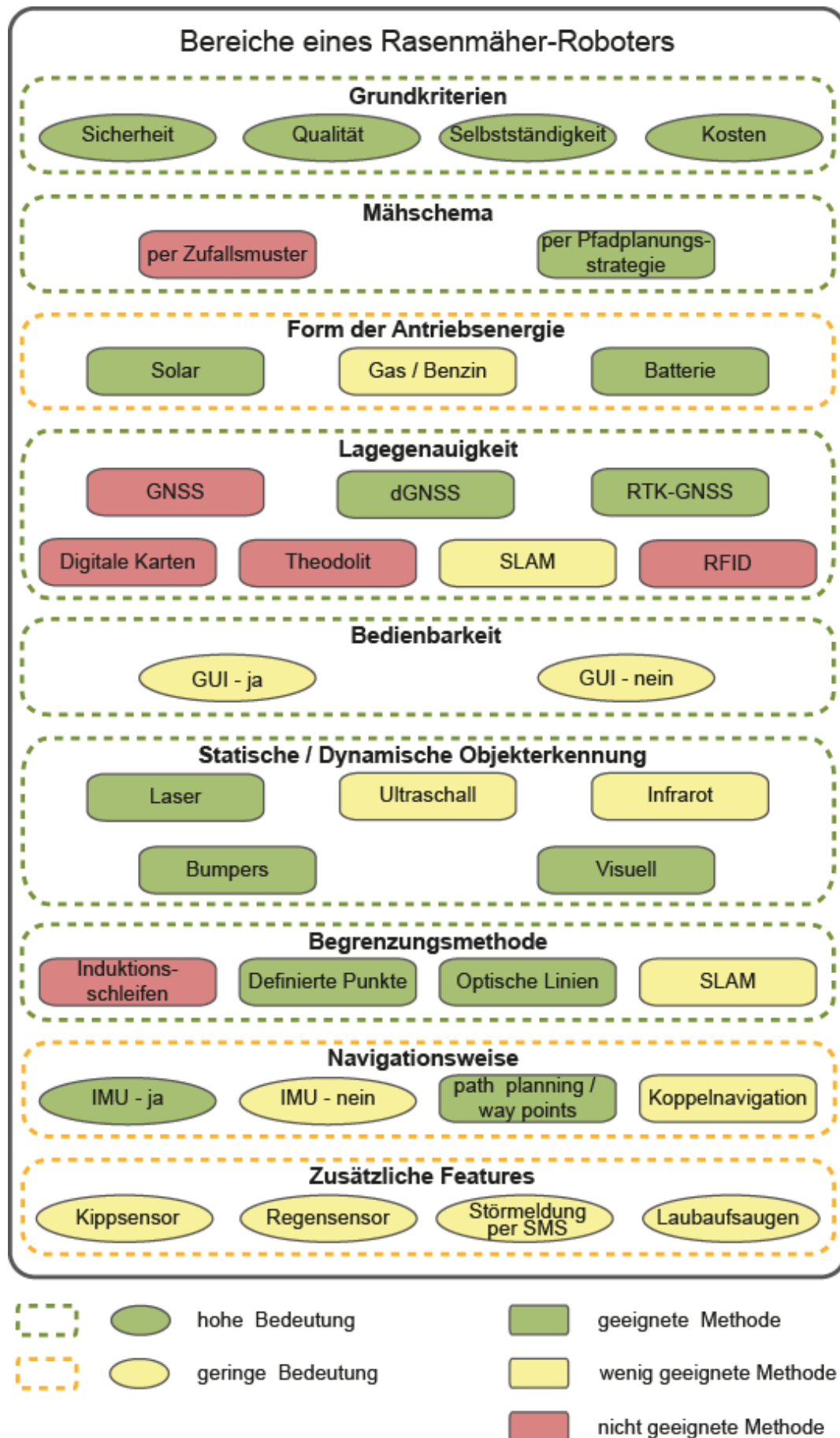


Abb. 37: Bereichskatalog für Rasenmäher-Roboter

Abb. 37 kann als zusammenfassende, graphische Beantwortung der ersten Forschungsfrage angesehen werden. Die Graphik beinhaltet mehrere Bereiche eines Rasenmäher-Roboters, die wiederum mehrere Methoden, Technologien und Systeme aufweisen können. Jene Methoden, die grün unterlegt sind, eignen sich für den Einsatz bei intelligenten Rasenmäher-Robotersystemen. Rot unterlegte Methoden sind hingegen nicht dafür geeignet. Für gelb markierte Methoden gilt, dass diese nur bedingt einsetzbar sind. Generell ist es schwierig, wenn nicht sogar unmöglich, "den" idealen, intelligenten Rasenmäher-Roboter zu beschreiben, da viele Faktoren berücksichtigt werden müssen. Die Abbildung kann als Baukastensystem verstanden werden. Je nach Gestalt und Beschaffenheit des zu mähenden Gebietes ergeben sich unterschiedliche Situationen. Jeder Bereich des Baukastens enthält unterschiedliche Elemente, die für die jeweilige Gegebenheit optimal aufeinander abgestimmt und zum Einsatz kommen können. In weiterer Folge werden die einzelnen Bereiche näher betrachtet.

- Grundkriterien

Der Bereich der Grundkriterien entspricht einem Spannungsfeld zwischen Sicherheit, Qualität, Selbstständigkeit und Kosten, wobei diese vier Faktoren alle anderen Bereiche stark beeinflussen. Die Kosten spielen hierbei eine entscheidende Rolle und wirken sich unmittelbar auf die anderen drei Kriterien aus. Nichtsdestotrotz muss ein intelligenter Rasenmäher-Roboter ein entsprechendes Maß an Sicherheit und Qualität bieten und dabei weitestgehend selbstständig operieren.

Die Sicherheit ist oberstes Gebot. In erster Linie müssen die gefährlichen Mähmesser ständig verdeckt sein und der Rasenmäher muss stets Kontakt mit dem Boden haben. Außerdem muss der Roboter Kollisionen vermeiden. Hinsichtlich Qualität darf es keine Unterschiede zu einem herkömmlichen Rasenmäher geben. Der Rasen muss vollständig, in gleicher Höhe gemäht werden. Dabei ist eine vollautomatische Arbeitsweise vorausgesetzt. Der Besitzer sollte höchstens im Zuge der Installation selbst tätig werden müssen.

- Mähschema

Die Untersuchung ergab, dass die derzeit dominierende Mähsystematik mittels Zufallsmuster unbefriedigend ist. Zur Erinnerung sei an dieser Stelle auf Abb. 6 verwiesen. Mit Hilfe einer Pfadplanungsstrategie soll es darüber hinaus möglich sein, bestimmte Muster (Streifen, Karo, Kreisförmig, usw.) in den Rasen zu mähen und dabei, aufgrund der höheren Effizienz, Energie zu sparen.

- Form der Antriebsenergie

Die Form der Antriebsenergie spielt nur eine untergeordnete Rolle. Ob solar-, batterie- oder gas- bzw. benzinbetrieben wirkt sich kaum auf die Performance des Rasenmä-

hens aus. Aus Gründen der Umweltfreundlichkeit sollten jedoch die beiden erstgenannten Antriebsenergieformen bevorzugt werden, wobei in diesem Fall die Kosten abgewogen werden müssen.

- Lagegenauigkeit

Die Lagegenauigkeit ist ein essentieller Bereich, wobei zumindest Subdezimeter-Genauigkeit garantiert werden sollte. Die Auswertung ergab, dass differentielle und Echtzeit kinematische globale Navigationssatellitensysteme dies ermöglichen sollten. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)-Methoden sollten ebenfalls in der Lage sein, diesen Genauigkeitsbereich zu erreichen, sind jedoch oftmals aufwendiger in der Umsetzung, gleichzeitig aber deutlich billiger. Dieser Bereich wird daher maßgeblich vom Kostenfaktor geprägt. In Kapitel 7 werden die einzelnen Methoden und Technologien näher betrachtet, wobei überprüft wird, ob diese tatsächlich im Stande sind die geforderte Präzision zu liefern.

- Bedienbarkeit

Die Bedienbarkeit muss grundsätzlich einfach und intuitiv sein. Im Idealfall sollte der Besitzer nach der Installation den Rasenmäher-Roboter nicht mehr bedienen müssen. Ob dabei ein Graphical User Interface (GUI) zum Einsatz kommen soll oder nicht, hängt vom Anwendungszweck ab. Je nach Bauart kann einem Rasenmäher-Roboter ein Navigationspfad einprogrammiert werden oder nicht. Trifft ersteres zu, muss ein entsprechendes GUI zur Verfügung stehen. Unter Umständen ist es aber auch notwendig bzw. kann es je nach Ausführung möglich sein, neue statische Objekte hinzuzufügen. In diesem Fall wäre ebenfalls ein GUI vorteilhaft. Für die Programmierung der Arbeitszeit wäre hingegen der Einsatz eines GUI nicht zwingend erforderlich. Auch in diesem Fall ist der Kostenfaktor entscheidend.

- Statisch / Dynamische Objekterkennung

Wird dem Rasenmäher-Roboter nicht im Vorhinein ein vordefinierter Pfad, inkl. Umfahrung von statischen Objekten einprogrammiert, ist es notwendig diese Hindernisse rechtzeitig zu erkennen und entsprechend der Sensordaten Ausweichmanöver einzuleiten.

Zur Objektdetektion stehen unterschiedliche Methoden und Technologien zur Verfügung, die allesamt Vor- und Nachteile haben. Die Auswertung ergab, dass die Verwendung von Lasertechnologie am besten eingestuft wird, jedoch auch die teuerste ist. Visuelle Systeme sollen hingegen weitaus billiger, aber dennoch zielführend sein. Ultraschall- und Infrarotsysteme sollen im Vergleich weniger robust gegen äußere Einflüsse sein und Berührungssensoren sollten hauptsächlich ergänzend eingesetzt werden. Ob die Ergebnisauswertung auch tatsächlich der Realität entspricht wird im Kapitel 8.4 untersucht.

- Begrenzungsmethode

Zur Begrenzung der zu mähenden Fläche stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Wider Erwarten ergab die Auswertung, dass viele Probanden der Meinung waren, dass die Begrenzungsmethode mittels Induktionsschleifen zumindest ausreichend effizient sei. Dieses Verfahren widerspricht jedoch einem intelligenten System eines Rasenmäher-Roboters. Erfolgsversprechende Methoden sind jene mit koordinativ bekannten Punkten oder optischen Linien, wobei hier wiederum der Kostenfaktor in Erscheinung tritt. Außerdem soll es mit Hilfe von SLAM-Methoden möglich sein, eine Abgrenzung vorzunehmen, wobei jedoch im Vergleich der Installationsaufwand weitaus höher ist.

- Navigationsweise

Die Navigationsweise scheint ebenfalls eine weniger wichtige Rolle einzunehmen. Ob eine inertielle Messeinheit (en. IMU) verwendet wird oder nicht hängt, vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Der Einsatz einer IMU bringt wesentliche Vorteile mit sich und führt zur Erhöhung der Positionsgenauigkeit, muss jedoch im wahrsten Sinne des Wortes teuer erkaufte werden. Die Befragung ergab, dass Pfadplanungsstrategien den Methoden der Koppelnavigation überlegen sein sollen. Ob dies wirklich der Fall ist, wird in Kapitel 8 aufgeklärt.

- Zusätzliche Features

Der Einsatz zusätzlicher Funktionen und Sensoren spielt eine untergeordnete Rolle. Sie sind als optional zu betrachten und in erster Linie mit dem Kostenfaktor verknüpft. Kipp- und Regensensoren sind zwar nützlich und können ebenfalls als Merkmale eines intelligenten Systems angesehen werden, müssen jedoch nicht zwingend integriert sein. Ein weiteres hilfreiches Feature sind Störmeldungen per SMS bzw. Fernsteuerung mittels SMS. Die Möglichkeit im Herbst Laub aufzusaugen, kann als weitere Funktionalität betrachtet werden, die nicht unbedingt implementiert sein muss.

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse der Fragebogenauswertung zusammenfassend präsentiert, wobei ein Bereichskatalog für Rasenmäher-Roboter abgeleitet wurde. Dieser kann als Baukastensystem verstanden werden. Da es nicht einen einzigen, sondern, viele so genannte intelligente Rasenmäher-Robotersysteme geben kann, ist es mit Hilfe dieses Baukastens möglich, für den jeweiligen Anwendungszweck und unter Berücksichtigung der vier Grundkriterien, einen idealen Roboter zusammenzustellen.

Nachdem die Anforderungen an intelligente Rasenmäher-Robotersysteme ausgemacht wurden, werden in den Folgekapitel 7 und 8 die vorgestellten Methoden genauer untersucht. Anschließend werden in Kapitel 9 die Resultate gegenübergestellt um herauszufinden, ob die gegenwärtige Technologie in der Lage ist, die Anforderungen zu erfüllen.

7 STATE OF THE ART I - DATENERFASSUNGSMETHODEN IM KONTEXT MOBILER, AUTONOMER ROBOTER

Dieses Kapitel befasst sich mit unterschiedlichen Datenerfassungsmethoden, die im Kontext mobiler, autonomer Roboter in Frage kommen. Dazu werden im nächsten Unterkapitel Methoden zur absoluten und relativen Positionierung unter die Lupe genommen. Anschließend wird über die Dualität der Kartierung und Lokalisierung diskutiert. Mit einer Betrachtung über deren Verschmelzung, im Bereich Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), endet dieses Kapitel.

7.1 Potentielle Datenquellen, deren Erfassungsmethoden und Funktionsweisen sowie Beschränkungen

Daten zur absoluten und relativen Positionierung können aus unterschiedlichen Quellen gewonnen werden. Die dazu zum Einsatz kommenden Methoden, deren Funktionsweisen und Beschränkungen sind Inhalt dieses Kapitels. Zunächst werden Primärdaten von Globalen Navigationssatellitensystemen und deren Modifizierungen zur absoluten und relativen Positionierung genauer betrachtet. Des Weiteren werden abgeleitete Sekundärdaten von großmaßstäbigen Karten analysiert. Abschließend werden Daten einer inertialen Messeinheit zur relativen Positionierung sowie alternative Positionierungstechniken behandelt.

7.1.1 Primärdaten von GNSS, dGNSS und RTK GNSS zur absoluten und relativen Positionierung von mobilen Robotern

Globale Navigationssatellitensysteme werden höchstwahrscheinlich in absehbarer Zukunft eine zentrale Rolle bei der Konzeption und Produktion von Rasenmäher-Robotern einnehmen. Diese Aussage wird durch die Anzahl an Beiträgen zu diesem Thema bekräftigt. Aus diesem Grund werden diese Systeme im Folgenden einer genaueren Untersuchung unterzogen. Wie diese Systeme eigentlich funktionieren, welche Genauigkeiten zu erwarten sind und welche Fehlerquellen vorliegen, ist Inhalt dieses Kapitels.

7.1.1.1 Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS): Systemaufbau, Erfassungsmethoden und deren Fehlerquellen

Globale Navigationssatellitensysteme sind aus der heutigen Zeit kaum noch wegzudenken. Sie werden zu Land, auf See und in der Luft zur Ortung und Navigation eingesetzt. Unter anderem sind sie als Navigationssysteme für Automobile, in Mobiltelefonen oder in Arm-

banduhren integriert. Zusätzlich werden sie im Bereich der geodätischen Primärdatenerfassung verwendet. Für den Gebrauch kommt jede Anwendung in Frage, bei der es notwendig ist, den eigenen Standort bzw. die zurückgelegte Strecke zu erfassen oder andere Orte bzw. Objekte zu orten.

- Systemübersicht

Das wohl bekannteste globale Navigationssatellitensystem ist NAVSTAR-GPS (Navigation Satellite Timing and Ranging - Global Positioning System), kurz GPS. Wie viele andere Systeme auch wurde dieses für militärische Zwecke, vom U.S. Department of Defense, ab 1973 entwickelt. Sieben Jahre später war der praktische Einsatz für militärische Aufgaben möglich. 1983 folgten erste geodätische Anwendungen. Ziel des Projektes war und ist, eine weltweite, dreidimensionale, hochgenaue Echtzeitnavigation zu gewährleisten, die zudem tages- und wetterunabhängig ist (vgl. [PAU-10]).

Neben GPS wurden weitere militärische Systeme entwickelt, wie z.B. GLONASS in der ehemaligen Sowjetunion bzw. heute in Russland, oder das noch im Aufbau befindliche System namens COMPASS in der Volksrepublik China. In Europa wird zurzeit ebenfalls an einem zivilen System, namens GALILEO gearbeitet, dessen Inbetriebnahme in den nächsten Jahren zu erwarten ist. Zusätzlich gibt es im Aufbau befindliche regionale Systeme in der VR China (Beidou), Japan (QZSS) und Indien (IRNSS). Eine Übersicht (Auszug) über bestehende Navigationssatellitensysteme (NSS) ist in Abb. 38 dargestellt.

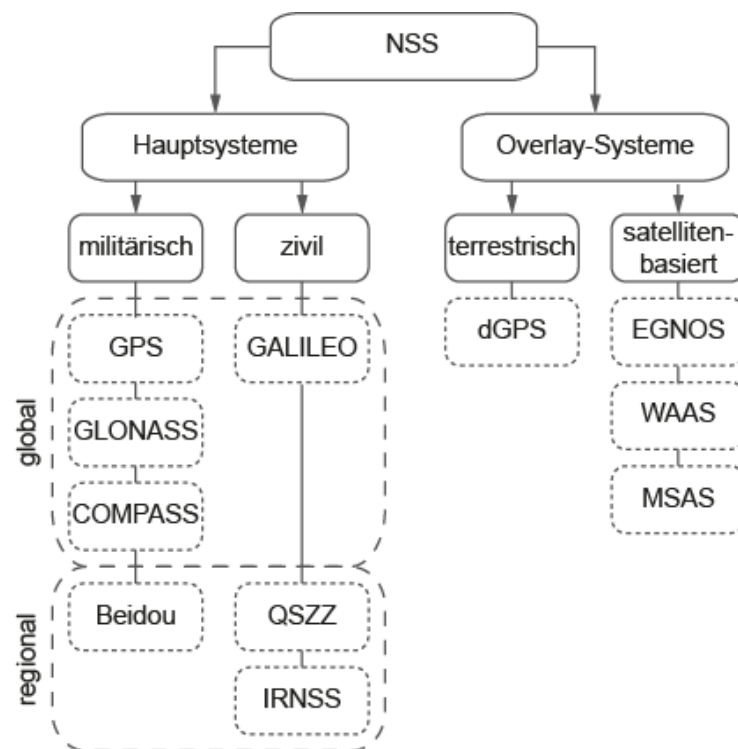


Abb. 38: Übersicht von Navigationssatellitensystemen (Auszug)

Quelle: nach [PAU-10], modifiziert

Neben diesen so genannten Hauptsystemen gibt es außerdem Overlay-Systeme, die als Ergänzung dienen (siehe Abb. 38). Diese Systeme können terrestrisch oder satellitenbasiert sein. Im ersten Fall handelt es sich dabei um Referenzstationen (dGNSS), die im nächsten Unterpunkt beschrieben werden. Im zweiten Fall wird von Satellite Based Augmentation System (SBAS) gesprochen, wobei es sich dabei meist um geostationäre Satelliten handelt. Dabei lassen sich Systeme wie EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), WAAS (Wide Area Augmentation System) oder MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) unterscheiden.

Das grundlegende Messprinzip von globalen und regionalen Navigationssatellitensystemen ist die Entfernungsmessung, basierend auf traditionellen Methoden der terrestrischen Datenerfassung. Der Unterschied zwischen den einzelnen genannten Systemen sind deren Parameter, wie z.B. Anzahl der Satelliten und deren Flughöhe sowie Übertragungsfrequenz, usw. (vgl. ebd.)

Welches der genannten globalen Hauptsysteme für intelligente Rasenmäher-Roboter schlussendlich eingesetzt wird, ist im Grunde nebensächlich. Das Funktionsprinzip wird an dieser Stelle anhand des amerikanischen Systems GPS erläutert.

- Bezugssystem

Satellitengestützte Vermessungsmethoden benötigen ein einheitliches, globales Koordinatensystem. Im Falle von GPS wird das World Geodetic System 1984 (WGS 84), basierend auf das Ellipsoid GRS 80 (Geodetic Reference System), verwendet (siehe Abb. 39).

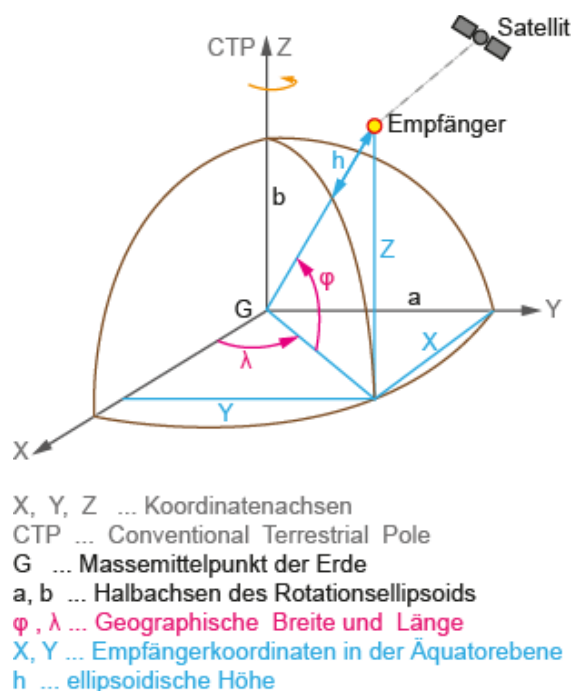


Abb. 39: Bezugssystem für satellitengestützte Vermessungen

Quelle: nach [PAU-10], modifiziert

Das dynamische Verhalten der Erde wirkt sich auf dieses System unmittelbar aus, da sich die Richtung zum Nordpol (CTP - Conventional Terrestrial Pole) ständig ändert. Dadurch sind auch die Parameter des WGS 84 ständig Veränderungen unterworfen. Die Erde ist zudem kein Körper, der exakt mathematisch beschrieben werden kann. Eine mögliche geometrische Annäherung ist die Kugel, die in vielen kartographischen Anwendungen ausreichend ist. Für geodätische Vermessungen ist die Kugel jedoch zu ungenau. Weitaus besser kann die Form der Erde mit Hilfe eines Rotationsellipsoids beschrieben werden (vgl. ebd.).

Eine physikalische Annäherung liefert hingegen ein Geoid, das die Masseunregelmäßigkeiten der Erde berücksichtigt und somit ein besseres Abbild der Erde ermöglicht. Es handelt sich dabei um die Niveaufläche (Potenzialfläche) der mittleren, ruhenden Meeresoberfläche. Diese kann jedoch nicht für Berechnungen herangezogen werden, weswegen auf das Rotationsellipsoid zurückgegriffen werden muss. Der Abstand entlang einer Lotlinie zwischen der Ellipsoidoberfläche und einem Punkt auf der tatsächlichen Erdoberfläche wird als ellipsoidische Höhe (h) bezeichnet (vgl. ebd.).

Ein aufgenommener GPS-Messpunkt kann sowohl in dreidimensionale, geozentrische Koordinaten (X, Y, Z), als auch in geographische Koordinaten (φ, λ, h) ausgegeben werden. Wie bereits erwähnt wurde, beziehen sich die geozentrischen Koordinaten auf das WGS 84. Außerdem wurde vermerkt, dass die Erde ständig Veränderungen unterworfen ist. Aus diesem Grund ist es notwendig die Daten mit aktuellen Messungen zu vergleichen. Zur Datenverdichtung und zur Qualitätssteigerung dienen unter anderem der Internationale Erdrotationsdienst (ITRF), Europäische Referenzdienst (EUREF) oder das AREF (Austrian Reference Frame).

- Systemarchitektur

Die GPS-Systemarchitektur besteht im Wesentlichen aus drei Segmente, Raum-, Nutzer- und Kontrollsegment (siehe Abb. 40).

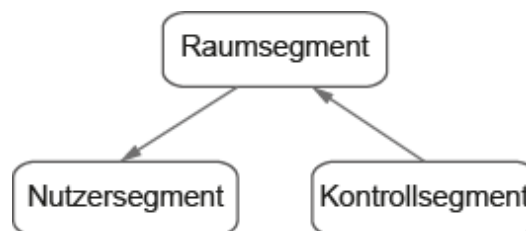


Abb. 40: GPS-Systemarchitektur

Quelle: nach [PAU-10], modifiziert

Das (Welt-)Raumsegment dient als zentrale Schnittstelle und übermittelt ständig Koordinatenangaben der einzelnen Satelliten. Insgesamt stehen 27 aktive Satelliten zur Ver-

fügung, wobei 24 ständig im Einsatz sind und drei als Reserve dienen. Aktiv bedeutet, dass Signale empfangen und weitergeleitet werden können. Die 800 Kilogramm bis 2.000 Kilogramm schweren Satelliten bewegen sich in einer Flughöhe von rund 20.200 Kilometer nahezu kreisförmig auf sechs Bahnebenen (60° Abstand, Bahnneigung 55°) um die Erde und benötigen dabei knapp zwölf Stunden. Die Satelliten weisen eine Lebensdauer von bis zu zehn Jahren auf und stürzen danach auf die Erde, wobei ein Großteil davon in der Atmosphäre verglüht. Während des aktiven Einsatzes werden sie mit Hilfe von Sonnenpaddeln, die immer zur Sonne hin ausgerichtet sind, mit Strom versorgt. Die Entfernungsmessung erfolgt mittels Laufzeitmessung, weswegen die Satelliten mit hochgenauen Atomuhren (Rubidium-Cäsium) bestückt sind, die innerhalb von 160.000 Jahren einen Fehler von einer Sekunde aufweisen. Zusätzlich sind die Satelliten mit unterschiedlichen Antennen zum Empfang und Aussenden von Signalen in unterschiedlichen Frequenzen im unteren Gigahertzbereich (GHz) bestückt (vgl. ebd. u. [BÖH-03], [URLa-23]).

Das Kontrollsegment, bestehend aus mehreren Bodenstationen, liefert hingegen Neuberechnungen der Umlaufbahnen und sendet ein- bis dreimal täglich entsprechende Korrekturdaten an die Satelliten (vgl. [PAU-10] u. [URLa-23]).

Das Nutzersegment dient als Empfänger und kann, wie bereits erwähnt, vielseitig und in unterschiedlichen Formen zum Einsatz kommen. Es besteht im Wesentlichen aus einer Antenne, die die Satellitensignale empfängt, wobei so genannte Mehrfrequenzempfänger mittlerweile als Standard angesehen werden können. Die Signalidentifikation erfolgt über die Hochfrequenzeinheit, die von einem Mikroprozessor gesteuert wird. Dieser steuert zudem die Erfassung und Weiterverarbeitung, im Sinne einer Echtzeitnavigationsberechnung, wobei die Daten im internen Datenspeicher abgelegt werden. Eine Kontrolleinheit ermöglicht dabei die Nutzerinteraktion mit dem Empfänger. Elektrischen Strom beziehen die meisten Geräte über interne oder externe Batterien (vgl. ebd.).

Das Satellitensignal besteht aus drei Trägerwellen (L1, L2, L5), die unterschiedliche Frequenzen aufweisen und mit Codes versehen sind. Diese Codes dienen zur eindeutigen Identifikation jedes Satelliten und enthalten zudem sowohl präzise als auch ungenauere Bahndaten sowie Zeitkorrekturinformationen, Korrektursignale zur Laufzeitberechnung und Daten über die Ionosphäre.

Die zivil nutzbaren C/A-Codes nehmen eine nicht unbedeutende Schlüsselrolle, vor allem bei militärischen Systemen, ein, da diese bewusst künstlich verfälscht werden können. In diesem Fall wird von der so genannten Selective Availability (SA) gesprochen. Zuletzt war dies im Jahr 2002 während des Irak-Krieges der Fall, als die militärischen Systeme mit den für das Militär vorbehaltenen P/Y-Codes überlastet waren. Seit 2007 wurden keine Verfälschungen mehr verzeichnet. Dennoch liegt diesbezüglich, aus ziviltechnischer Sicht, eine gewisse Unsicherheit bzw. Abhängigkeit von einem militärischen System

vor, was ebenfalls ein Grund und Ansporn für die Entwicklung von zivilen Systemen ist (vgl. ebd.).

- Ortsbestimmung

Zur zweidimensionalen Ortsbestimmung sind drei, zur dreidimensionalen hingegen vier Satelliten erforderlich. Das dahinterstehende Prinzip ist ein (räumlicher) Bogenschnitt (siehe Abb. 41). Bei einem zweidimensionalen Bogenschnitt werden eigentlich nur zwei Kreisbögen benötigt. Der Schnittpunkt der Kreisradien entspricht dem Standort, wobei zwei Lösungen möglich sind. Die Ermittlung der Position auf der Erde ist bei satellitengestützten Vermessungen deswegen einfach, da eine der beiden resultierenden Standorte im Weltall ist.

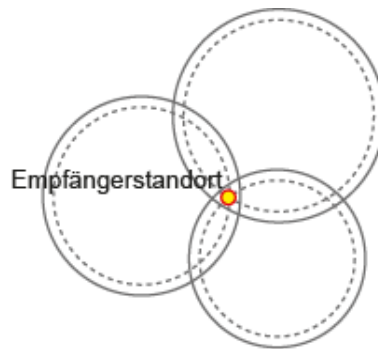


Abb. 41: Vereinfachte Darstellung eines räumlichen Bogenschnitts

Für dreidimensionale Messungen werden drei Kreise bzw. Satelliten benötigt, um zusätzlich zu den Lage- auch Höheninformationen zu erhalten. Die in Abb. 41 dargestellten Kreise sind als Isochronen zu interpretieren, wobei die vollen Kreise die Satellitenzeit und die unterbrochenen Kreise die Empfängerzeit darstellen. Dabei ist zu erkennen, dass die beiden Uhren von Empfänger und Satellit nicht synchron sind.

Tatsächlich bedarf es für die dreidimensionale Messung jedoch mindestens vier Satelliten, da es sich um Laufzeitmessungen mit Hilfe der Codes handelt. Die zentrale Beobachtungsgröße wird als Pseudodistanz (en. Pseudorange, PSR) bezeichnet. Die Entfernungen entsprechen dem Produkt aus der Lichtgeschwindigkeit und der Zeit, die die Signale zurücklegen. Das Problem dabei ist, dass keine exakte Synchronisation zwischen den Empfänger- und Satellitenuhren vorliegt, wodurch so genannte Pseudodifferenzen entstehen. Zur Korrektur wird somit ein vierter Satellit benötigt (vgl. ebd. u. [ZWI-12]).

Eine andere Methode zur Entfernungsmessung ist die Phasenmessung, bei der die Phasenverschiebung an der Trägerwelle ermittelt wird. Mit Hilfe einer Referenzphase kann die Phase des ankommenden Signals verglichen und daraus die Phasenverschiebung und das Phasenreststück bestimmt werden. Das bedeutet, dass die Länge einer übermittelten Phase eruiert werden kann. Mit Hilfe der Pseudodistanzmessung wird die so ge-

nannte Mehrdeutigkeitslösung (en. Ambiguity Resolution) im Empfänger durchgeführt, wobei die Anzahl an ganzen Wellenlängen auf der Distanz zwischen Satellit und Empfänger ermittelt wird. Im direkten Vergleich liefern Phasenmessungen exaktere Ergebnisse als Codemessungen (vgl. [PAU-10]).

- Vorteile

GNSS-Messungen haben den Vorteil, dass jeder Punkt einer unabhängigen Messung entspricht und dabei, aufgrund der Koordinaten, keine Sichtverbindung zwischen den gemessenen Punkten notwendig ist. Eine zusätzliche Signalisierung und eine damit verbundene Feldarbeit entfallen somit. Es handelt sich außerdem um geometrische Methoden, die vom Schwerfeld unabhängig sind. Zudem sind die Messungen wetterunabhängig. Es wird lediglich eine theoretische Sichtverbindung zwischen Empfänger und Satellit vorausgesetzt. Des Weiteren ist es mit Hilfe von GNSS möglich eine dreidimensionale Punktbestimmung mit nur einer Messung durchzuführen. Aufgrund der vorliegenden Charakteristika ist es ebenfalls machbar größere Distanzen zu überbrücken, was wiederum mit einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit einhergeht (vgl. ebd.).

- Nachteile

Solange noch kein ziviles System einsatzfähig ist, besteht weiterhin die Abhängigkeit von militärischen Systemen und die damit verbundene Möglichkeit verfälschte Signale zu erhalten. Weitere Nachteile sind die nur schwer erfassbaren Einflüsse der Ionos- und Troposphäre, die die Signale störend beeinflussen. Zudem sind die übermittelnden Signale störanfällig rund um Sendeanlagen, Radarstationen oder Hochspannungsleitungen. Theoretische Sichtverbindungen sind zwar notwendig, was jedoch nicht bedeutet, dass überall Messungen durchgeführt werden können. Vor allem in abgeschatteten Bereichen in Wäldern, Städten oder Tälern können Messungen unter Umständen nicht durchgeführt werden. Hinzu kommt, dass es für die weitere Bearbeitung der Daten es mitunter notwendig ist bzw. sein kann, diese in das bestehende Landesvermessungssystem einzupassen (vgl. ebd. u. [MÜL-12]).

- Absolute Positionierung

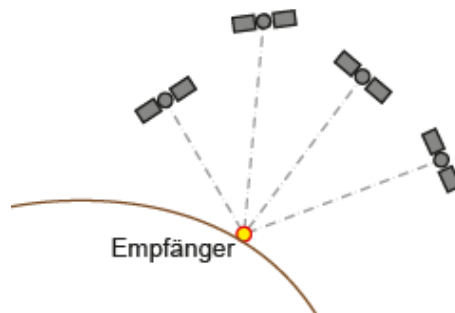


Abb. 42: Konstellation einer absoluten Positionierung

Die einfachste Methode zur Positionierung benötigt einen Empfänger und vier Satelliten (siehe Abb. 42). Diese Konstellation wird als absolute Positionierungstechnik bzw. als OPPP (Online Precise Point Positioning) bezeichnet und liefert mit Hilfe von Zustandsmodelldaten, SSR (State Space Representation), Lagegenauigkeiten von bis zu fünf Meter (vgl. [JÄG-12]).

- Fehlerquellen

Die Genauigkeit einer GPS-Positionierung kann aufgrund mehrerer Ursachen sinken. Einige Störeinflüsse wurden bereits zum Thema Nachteile von GNSS erwähnt. Des Weiteren ist der Empfängertyp von entscheidender Bedeutung, da je mehr Frequenzen empfangen werden können, die Positionsberechnung umso genauer durchgeführt werden kann. Die Satellitenkonfiguration spielt ebenfalls eine nicht zu unterschätzende Rolle, da je näher sich diese zueinander befinden, desto ungenauer das Messergebnis werden kann. Zudem wirkt sich die Beobachtungsdauer auf die Genauigkeit der Positionierung aus. Hinzu kommt der so genannte Multipatheffekt, wobei z.B. von Seeflächen reflektierende Signale die Messung beeinflussen und verfälschen können (vgl. ebd. u. [URLa-17]).

Im Bereich der Rasenmäher-Roboter ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass die rotierenden Mähmesser elektromagnetische Interferenzen hervorrufen können, die in weiterer Folge die aufgenommenen Signale stören können (vgl. [URLa-12] u. [URLa-17]).

Der größte Einfluss auf die Genauigkeit ist jedoch die Messmethode, wobei das absolute Messverfahren bereits erläutert wurde. Eine Lagegenauigkeit von bis zu fünf Metern ist jedoch im Falle von Rasenmäher-Roboter unbefriedigend. Dennoch gibt es einige Prototypen, die auf diese Methode zurückgreifen und im Folgenden kurz vorgestellt werden. Für weiterführende Informationen sei auf die angeführten Literaturbeiträge verwiesen.

- Prototypen

GPS-Technologie zur globalen Positionierung von Rasenmäher-Robotern wurde erfolgreich von M. WASIF ([WAS-11]) eingesetzt, allerdings mit den aufgezeigten Ungenauigkeiten. Zur Navigation und relativen Positionierung wurde bei diesem Prototyp allerdings auf Odometriedaten zurückgegriffen.

B.-M. SHIU et al. ([SHI-08]) setzten bei ihrem Rasenmäher-Roboter GPS für einen anderen Zweck ein, nämlich zur Begrenzung der zu mähenden Fläche. Diese Methode wird im Kapitel 8.1.1 untersucht. Des Weiteren wurde das GNSS bei diesem Prototyp zur globalen Positionierung im Zuge der Behandlung des Kidnapped Robot Problems eingesetzt.

Bei der Entwicklung des Prototyps "BIGFOOT" verwendeten A. BERTANI et al. ([URLa-16]) GPS lediglich als Backup-System und Kompass, für den Fall, in dem die zentrale Navigationseinheit mittels Koppelnavigation ausfällt.

Zur Minimierung des GPS-Messfehlers verwendeten die Mitglieder des New Haven Robotics Club zwei GPS-Empfänger für ihren Rasenmäher, namens "Deep Green". Von jedem Datenpaar wird der Mittelwert der geographischen Länge und Breite berechnet und für die weitere Navigation verwendet. Mit Hilfe dieser Berechnung kann eine Lagegenauigkeit von ca. 2,5 Meter erreicht werden, was jedoch, unter Berücksichtigung der gewöhnlichen Einsatzgebiete von Rasenmähern, nur als unbefriedigend angesehen werden kann.

Die Beispiele zeigen, dass herkömmliche absolute GNSS-Positionierungstechniken im Bereich von Rasenmäher-Roboter zwar eingesetzt werden können, diese jedoch nicht die geforderte Genauigkeit liefern. Die Untersuchung hat ebenfalls gezeigt, dass GNSS vor allem aber auch für andere Anwendungen bzw. als Backup-System im Notfall zum Einsatz kommen.

Nachdem im Allgemeinen globale Navigationssatellitensysteme und dabei speziell GPS und deren absolute Messmethode untersucht wurden, wird im nächsten Kapitel die Relativmessung unter die Lupe genommen.

7.1.1.2 Differentielles Globales Navigationssatellitensystem (dGNSS)

Eine wesentliche Steigerung der Genauigkeit von GNSS-Messungen wird mit Hilfe einer oder mehrerer Referenzstationen erreicht, wobei Koordinatendifferenzen bestimmt werden (siehe Abb.43). In diesem Fall wird von einer relativen oder differentiellen GNSS (dGNSS) Messung gesprochen, wobei Beobachtungskorrekturdaten, OSR (Observation Space Related), verwendet werden (vgl. [JÄG-12]). In Österreich bietet das Austrian Positioning Service (APOS) des Bundesamt für Eich- und Vermessungswesens (BEV) ein über Österreich verteiltes, flächendeckendes Netz an Permanentstationen, wobei Signale von GPS- und GLONASS-Satelliten genutzt werden können.

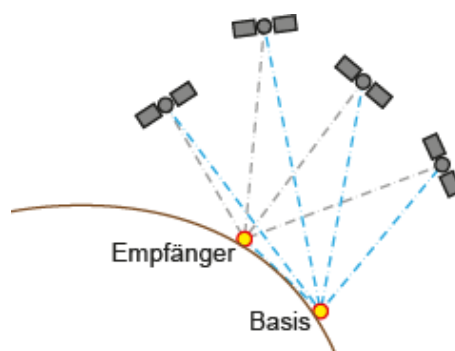


Abb. 43: Konstellation einer relativen Positionierung

Während die Position des Empfängers ermittelt werden soll, muss jene der Basis exakt bekannt sein. Zwischen Empfänger und Basis muss eine Funkverbindung gewährleistet sein, wobei die Distanz zwischen diesen beiden mehrere 100 km betragen kann. Dabei muss nur sichergestellt werden, dass sowohl Empfänger, als auch Basis dieselben

vier Satelliten ansprechen. Dadurch kann die Lagegenauigkeit enorm gesteigert werden und beträgt zwischen 0,1 Meter und 1 Meter, da die Fehlereinflüsse größtenteils eliminiert werden (vgl. [PAU-10]).

Neben dieser Echtzeit-Messvariante ist es möglich die Genauigkeit im Postprocessing, also im Anschluss der Messungen im Büro, weiter zu erhöhen. Anstelle von Codemessungen wird dabei fast ausschließlich auf Phasenmessungen zurückgegriffen, wobei mit entsprechenden Korrekturdaten eine Lagegenauigkeit von einem bis zehn Millimeter erreicht werden kann (vgl. ebd.).

Diese Genauigkeit entspricht jener, die für den Einsatz von Rasenmäher-Roboter gefordert ist. So ist es nicht verwunderlich, dass viele Prototypen auf dieser Technologie basieren. Einige davon werden in weiterer Folge kurz vorgestellt, wobei auch an dieser Stelle auf weiterführende Informationen, die über die angeführten Literaturstellen zur Verfügung stehen, hingewiesen werden soll.

- Prototypen

Viele Rasenmäher-Roboter-Prototypen basieren auf dGNSS-Technologie zur Navigation innerhalb der zu mähenden Fläche. Dabei hat sich gezeigt, dass diese Methode zuverlässig ist. Oftmals ist das dGNSS jedoch nur ein Teil einer ganzen Multisensoreinheit, die auf dem Roboter befestigt ist. Die Hauptaufgabe liegt in diesen Fällen bei der Bestimmung der Ausgangsposition. Beispiele dafür sind unter anderem in [URLa-17], [URLa-19], [URLa-21], [SCHa-09], [DAL-10] und [SMI-05] nachzulesen.

Der "Redblade" der Miami University (vgl. [URLa-14]) sowie die "Grass Shredding Unit" der Georgia Southern University (vgl. [URLa-02]) verfolgen eine gemeinsame Strategie. Dabei werden zunächst mittels dGNSS-Technologie die Grenzen der zu mähenden Fläche ermittelt, woraufhin ein Algorithmus automatisch Wegpunkte (en. way points) generiert. Einen ähnlichen Ansatz, bei dem ein dGNSS zur Generierung und somit zur Navigation eingesetzt wurde, zeigt der Prototyp "InstiGator" der University of Florida (vgl. [URLa-06] u. [URLa-20]) auf. Mehr dazu im Kapitel 8.1.1 und 8.3.

Es wurde nachgewiesen, dass differentielle GNSS-Technologie für autonome Navigationsprozesse, für den von Rasenmäher-Roboter geforderten Genauigkeitsbereich, geeignet ist. Dabei wird diese Technik jedoch häufig in Kombination mit weiteren Sensoren und Systemen, die zu einer Multisensoreinheit zusammengefasst sind, eingesetzt. Außerdem eignet sich dGNSS hervorragend zur Ermittlung von Grenzlinien und -punkten.

7.1.1.3 Real Time Kinematic Vermessung (RTK)

Differentielle GNSS-Messungen ermöglichen in Echtzeit, wie bereits erwähnt, ein hohes Genauigkeitsmaß im Submeterbereich, das für viele Anwendungen ausreichend ist. Für Rasenmäher-Roboter wäre es jedoch ideal, den Genauigkeitsbereich von Postprocessing-

dGNSS (Subzentimeter) zu erreichen. Dies ist mit Hilfe der RTK (Real Time Kinematic)-Technologie möglich.

Die Kinematik tritt in vielen unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen auf, wodurch dem Begriff viele Bedeutungen zugeschrieben werden können. Bezogen auf dieses Anwendungsgebiet, kann die Kinematik als Bewegungslehre angesehen werden. Für die Navigation ist es, wie in den einleitenden Kapiteln bereits erwähnt wurde, nicht nur notwendig zu wissen, wo etwas ist. Die alleinige Position ist nicht ausreichend. Zusätzlich müssen Informationen zur Orientierung und Geschwindigkeit vorliegen. Diese Größen können zusammenfassend als Navigationszustandsvektor bezeichnet werden (vgl. [JÄG-12] u. [MÜL-12]).

Entgegen den Vermutungen, die die Bezeichnung Real Time Kinematic vielleicht hervorruft, werden im Zuge von RTK-Vermessungen keine kinematischen Daten wie Fahrtrichtung, Geschwindigkeit und Beschleunigung ermittelt. Stattdessen werden wie bei gewöhnlichen GNSS-Empfängern auch, geographische bzw. geozentrische Daten in Form von geographischer Länge λ und Breite φ bzw. X-, Y-, Z-Koordinaten bestimmt.

RTK-Vermessungen basieren auf OTF (On The Fly)-Algorithmen. Diese ermöglichen auch in Echtzeit Mehrdeutigkeitsprobleme (en. Ambiguities) zu lösen. Das RTK-System ist dem dGNSS sehr ähnlich. Auch hier werden Referenzstationen, deren Koordinaten eindeutig bekannt sind, benötigt. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass die Distanz zwischen Empfänger und Basis maximal zwei bis drei Kilometer betragen darf. Nur dann ist es möglich, mit einer leistungsstarken Telemetrie in angemessener Zeit die Datensätze samt der Trägerphase zu übermitteln (vgl. [URLa-23]). RTK-Systeme verlangen die Installation einer Basisstation, die Distanz- und Phasenmessungen durchführen, wodurch eine höhere Genauigkeit erzielt werden kann.

Käuflich erwerbliche RTK-Systeme, die hauptsächlich bei geodätischen Vermessungen zum Einsatz kommen, *"... bestehen in der Regel aus zwei GPS Empfängern, einer Telemetrie zur Datenübertragung und der zugehörigen Software."* (ebd.)

Das hohe Maß an Genauigkeit fordert jedoch seinen Preis. Einerseits sind mindestens zwei Empfänger notwendig. Andererseits sind RTK-taugliche GNSS-Empfänger wesentlich teurer als herkömmliche Empfänger. Diesbezüglich gilt es abzuwägen, welche Genauigkeitsklasse für intelligente Rasenmäher-Roboter ausreichend bzw. angemessen ist.

- Prototypen

Beispiele zeigen, dass auch bei Verwendung von RTK-GNSS, die Navigation von Rasenmäher-Roboter mit zusätzlichen Sensoren oder einer inertialen Messeinheit unterstützt wird. Dies trifft z.B. für den "Lawn Transformer" der California State University Fullerton zu (vgl. [URLa-15]). Prototypen, die ausschließlich mittels RTK-GNSS Techno-

logie selbstständig navigieren können, sind in [URLa-01], [URLa-12] und [MEL-12] beschrieben.

Es kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich alle drei untersuchten Methoden und Techniken für den Einsatz bei intelligenten Rasenmäher-Robotern, mehr oder weniger eignen. Auch herkömmliche GPS-Verfahren mit absoluten Positionsberechnungen können z.B. als Backup-System in Kombination mit anderen inertialen Sensoren verwendet werden, um den Roboter im Störfall in eine "sichere" Zone zu geleiten.

Differentielle GNSS-Messungen sind vor allem für die Ermittlung von Grenzpunkten bzw. -linien gut geeignet, wobei der Anwender im Postprocessing, im Zuge der Installation, eine hohe Genauigkeit erzielen kann.

Für den tatsächlichen Mäheinsatz eignet sich vor allem Real Time Kinematic GNSS, wobei in Echtzeit Postprocessing-dGNSS Genauigkeit zur Navigation erreicht wird.

Das nächste Kapitel widmet sich einer anderen potentiellen Datenquelle, die im Kontext von Rasenmäher-Roboter bisher, soweit dem Autor bekannt, noch nicht aufgegriffen wurde. Welche hochauflösenden Karten diesbezüglich überhaupt in Frage kommen und ob diese tatsächlich als alternative Datenerfassungsmethode in Betracht gezogen werden können, wird im folgenden Kapitel untersucht.

7.1.2 Sekundärdaten aus vorhandenen analogen/digitalen Karten

Während GNSS-Daten Primärdaten liefern, können Karten in analoger oder digitaler Form Sekundärdaten im Kontext von intelligenten Rasenmäher-Robotern bereitstellen. Karten entsprechen, gemäß dem kartographischen Kommunikationsnetzes, einem Sekundärmodell (vgl. [HAK-02]). Das bedeutet, dass Karten die Umsetzung des Primärmodells des Fachmanns in das Darstellungsmodell des Kartographen sind und somit bereits "Verfälschungen" aufweisen, da sie vereinfachende Abbilder der Natur sind und der Kartograph bei der Kartenherstellung Methoden der Generalisierung anwenden muss.

Karten besitzen einen Kartenmaßstab, der als lineares Verkleinerungsverhältnis der Karte gegenüber der Natur angesehen werden kann. Anhand der in Österreich flächendeckend zur Verfügung stehenden Karten, soll, auch stellvertretend für andere staatlichen Kartenwerke, untersucht werden, ob diese als Informationsquelle für Rasenmäher-Roboter geeignet sind.

Innerhalb der staatlichen Kartenwerke Österreichs beträgt der größte Maßstab 1:25.000. Das bedeutet, dass vier Zentimeter auf der Karte, einem Kilometer in der Natur entsprechen (vgl. ebd.). Diesen Maßstab weisen jedoch lediglich nur zwei Gebietskarten des Schneeberg-Rax Gebietes und des Wiener Umlandes auf. Die österreichische Karte ÖK 25V entspricht lediglich einer Vergrößerung der österreichischen Grundkarte, der so genannten ÖK 50, die einen Maßstab von 1:50.000 aufweist. Somit scheiden die amtlichen Kartenwerke für die Zwecke eines Rasenmäher-Roboters aus.

Hingegen haben Mappenblätter des österreichischen Katasters weitaus größere Maßstäbe von 1:1.000, 1:2.000 und 1:5.000. Diese Kartenblätter liefern den Nachweis über die Eigentumsrechte an Grund und Boden, enthalten dabei Informationen über Fest- und Grenzpunkte, Grundstücksgrenzen und -nummern, Gebäude und Benützungsarten (vgl. ebd.). Diese landesweit und digital verfügbare Datenquelle dient außerdem als Grundlage für die Erstellung von Bebauungs- und Flächenwidmungsplänen. Der Maßstab der Mappenblätter ist dabei von der Größe der einzelnen eingezeichneten Grundstücke abhängig. Je kleiner die Grundstücke, desto mehr Eintragungen sind auf den Kartenblättern ersichtlich zu machen und umso größer muss deshalb der Maßstab gewählt werden. Bei dem größten Maßstab 1:1.000 entspricht ein Millimeter auf der Karte, einem Meter in der Natur. Somit ist auch diese Datenquelle für Rasenmäher-Roboter denkbar ungeeignet, da diese schlichtweg zu ungenau für diesen Anwendungsfall ist.

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass selbst die großmaßstäbigsten Karten, die flächendeckend zur Verfügung stehen, für Rasenmäher-Roboter nicht als Datenquelle in Frage kommen. Das nächste Kapitel widmet sich der relativen Positionierung mittels inertialer Messtechnik.

7.1.3 Daten der Inertialen Messeinheit zur relativen Positionierung

Inertiale Daten basieren auf einem physikalischen Messprinzip und sind daher nicht, wie etwa GNSS-Verfahren, vom Schwerfeld abhängig. Die Messungen beziehen sich nicht auf eine mathematische Beschreibung der Erde, z.B. eine Kugel, sondern auf das Geoid. Inertiale Messungen sind Relativmessungen, da ausgehend von einem koordinativ bekannten Punkt kinematische Informationen zur Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ausrichtung ermittelt werden. Es handelt sich dabei um einen autonomen Einsatz, da dieses Messsystem nicht von anderen Systemen abhängig ist (vgl. [PAU-10]).

Inertiale Messeinheiten zählen somit zu den so genannten infrastruktur-autarken Systemen, während beispielsweise globale Navigationssatellitensysteme infrastruktur-basiert sind, da diese das Vorhandensein von georeferenzierten Landmarken voraussetzen (vgl. [JÄG-12], [MÜL-12] u. [SOM-12]). Im Gegensatz dazu können zu den infrastruktur-autarken (Mess-)Systemen unter anderem Beschleunigungssensoren, Gyroskope, Neigungsmesser, Magnetometer und Barometer gezählt werden. Eine detaillierte Auflistung dazu ist in [JÄG-12] zu finden.

Die zurückgelegte Entfernung wird mit Hilfe einer Beschleunigungsmessung über die Zeit bestimmt. Die Beschleunigung selbst entspricht der Geschwindigkeit pro Zeit. Ein derartiges System weist den unvermeidlichen Nachteil auf, dass die Genauigkeit über die Zeit hinweg abnimmt, da sich die einzelnen Messfehler aufsummieren. Hybride Systeme verwenden diesbezüglich zusätzlich eine GNSS-Einheit, die fortlaufend Korrekturdaten liefert (vgl. [PAU-10]).

- Vor- und Nachteile

Aufgrund des zugrundeliegenden physikalischen Messprinzips sind die Signale einer inertialen Messeinheit äußerst robust gegen äußere Signale oder dem Erdmagnetfeld. Das Verfahren ist zudem wetterunabhängig und kann in vielen Bereichen eingesetzt werden, in denen die GNSS-Technologie versagt, z.B. unter Tag, in Tunneln, unter Wasser oder in abgeschatteten Gebieten.

Jedoch sind keine Absolutmessungen möglich, wobei die Lagegenauigkeit, die von der Zeit abhängig ist, im Dezimeterbereich anzusiedeln ist. Hinzu kommt, dass diese Systeme relativ teuer sind und mehrere tausend Euro kosten können. Das Gewicht von ca. zehn Kilogramm und die Größe einer inertialen Messeinheit können unter Umständen bei Verwendung konventioneller Sensoren ebenfalls Probleme bereiten, vor allem bei kleineren Robotern. Mit Hilfe der MEMS (Micro Electrical Mechanical System)-Technik kann dieses Problem, jedoch mit entsprechenden Genauigkeitseinbußen, umgangen und gleichzeitig der Kostenfaktor (ca. 150 \$ bis 800 \$) niedrig gehalten werden (vgl. ebd.).

- Messprinzip

Das inertielle Navigationssystem kann auch als Trägheitsnavigationssystem bezeichnet werden. Dieser Begriff ist auf das zugrunde liegende Prinzip der Massenträgheit zurückzuführen, da sich innerhalb der Trägheitsplattform eine bekannte Masse in Ruhe befindet. Bei Positionsänderungen, wird die Beschleunigung dieser Masse in alle drei Richtungen gemessen. Dabei sind die Einflüsse der Gravitations-, Zentrifugal- und Corioliskraft, die zusätzlich zur Beschleunigung der Navigationsplattform die Masse beeinflussen, zu berücksichtigen (vgl. [MÜL-12]).

Wurde früher auf mechanische Kreiselssysteme gesetzt, werden heutzutage oftmals sogenannte unkonventionelle Sensoren, die auf MEMS-Technologie basieren, verwendet, die keine mechanischen Sensoren zur Beschleunigungs- und Richtungsmessung mehr verwenden. Die MEMS-Technik führte dazu, dass der Anwendungsbereich von inertialen Messeinheiten vergrößert wurde, da die Baugröße der Messeinheiten wesentlich verkleinert werden konnte. Inertialsensoren werden heutzutage z.B. auch in Smartphones, Kameras oder Spielekonsolen verbaut (vgl. ebd.).

In weiterer Folge werden auszugsweise einzelne Bestandteile einer inertialen Messeinheit und der dadurch ermittelten Daten näher betrachtet.

- Gyroskopdaten

Gyroskope sind Kreismessinstrumente die auf unterschiedliche Art und Weise ausgeführt sein können, weswegen mehrere Gyroskoparten differenziert werden können. Bei MEMS-Kreisel wird die Vibration, die durch eine Drehung entsteht und von der Coriolis-

kraft beeinflusst wird, ausgenutzt. Beispielsweise weist das so genannte Tuning-Fork-Gyroskop eine Stimmgabelform auf, wobei im Zuge von Drehbewegungen zwei Massen gegenphasig entlang einer Achse schwingen. Die Drehung um eine Achse hat eine Auslenkung auf einer anderen Achse zur Folge, die wiederum induktiv gemessen und als Rotationsgeschwindigkeitsmaß interpretiert werden kann (vgl. ebd.).

Neben diesen mechanischen Systemen, bei denen die Corioliskraft ausgenutzt wird, gibt es außerdem optische Gyroskopsysteme, die auf dem Sagnac-Effekt basieren. Dieser beschreibt eine Phasenverschiebung in gegensätzlicher Richtung, die des Weiteren als Messgröße dient. Faseroptische Gyroskope (FOG) verwenden Laserstrahlen, die spiralarig über Glasfasern geführt und an ihren Enden vereinigt werden. Bei Rotationsbewegungen entstehen die erforderlichen Phasenverschiebungen. Eine andere optische und ebenfalls auf Laser basierende Methode verwendet hingegen ein Ringsystem mit Spiegeln.

- Daten von Beschleunigungssensoren

Beschleunigungsmesser, basierend auf MEMS-Technologie, können in zwei Klassen unterteilt werden. Ein Messprinzip basiert auf einem Feder-Masse-System. Dabei ist an einer Feder eine bekannte Masse aufgehängt. Kommt es zur Beschleunigung der Navigationsplattform, so dehnt sich die Feder, je nach Stärke der Beschleunigung, aus. Diese Ausdehnung dient im Weiteren als Messgröße. Das Messprinzip nutzt die Eigenfrequenz von Quarz aus. Die bekannte Masse ist dabei zwischen Quarzen eingelagert. Bei Bewegungen kommt es innerhalb der Quarze zu Druck- und Zugbelastungen bzw. Stauchungen und Dehnungen, die sich wiederum auf deren Eigenfrequenzen auswirken und gemessen werden können (vgl. ebd.).

- Daten des digitalen Kompasses bzw. eines Magnetometers

Zur Navigation ist die Ausrichtung bzw. Orientierung essentiell. Zur Ermittlung dieser Messgröße kann ein herkömmlicher analoger Kompass verwendet werden, bei dem die Kompassnadel entlang der Magnetfeldlinien Richtung Norden ausgerichtet wird. In modernen Navigationsplattformen wird vor allem bei Verwendung der MEMS-Technologie oftmals ein Magnetometer eingesetzt, das die Flussdichte misst, wodurch klassische Kompassfunktionen ausgeführt werden können (vgl. ebd.).

Der Roll-Nick-Gier Winkel (en. Roll-Pitch-Yaw) ist ein in der Navigation oft verwendeter Begriff und beschreibt die Orientierung im dreidimensionalen Raum. T. MÜLLER et al. halten diesbezüglich fest, dass "*... Magnetometer häufig [...] zusammen mit Gyroskopen und Beschleunigungsmessern verwendet*" werden. "*Die Gyroskope erfassen dabei die kurzzeitigen dynamischen Änderungen der Orientierung. Die Beschleunigungsmesser und Magnetometer dienen zur Korrektur des Systems über einen längeren Zeitraum hinweg.*" (ebd., S. 32)

- Nachteile der MEMS-Technologie

Mikro-Elektromechanische Systeme (MEMS) ermöglichen einen wirtschaftlich vertretbaren Einsatz von inertialen Messtechniken im Bereich von Rasenmäher-Robotern. Allerdings weisen diese, im Vergleich zu konventionellen Trägheitsnavigationssystemen, Nachteile in Form von Nullpunktsfehlern (Bias) auf. *"Ein Bias im Beschleunigungssensor führt zu einem Geschwindigkeitsfehler proportional mit der Zeit t und einem Positionsfehler proportional zu t^2 . Damit hat man bei einem Bias von 0.1 m/s^2 bereits nach 10s einen Positionsfehler von 5m. Ein Bias im Gyroskop führt in der Geschwindigkeit zu einem mit t^2 und in der Position zu einem mit t^3 anwachsenden Fehler."* (ebd., S. 31)

Um diesen Fehlereinfluss zu minimieren ist es möglich, systematische Fehler mathematisch zu modellieren, die zur Kalibrierung des Systems eingesetzt werden können oder während des Navigationsprozesses on the fly zur Schätzung von Zusatzparameter beitragen, wobei jedoch diese mit externen Referenzmessungen kombiniert werden müssen (vgl. ebd.).

- Prototypen

Eine Reihe von Rasenmäher-Prototypen verwendet als ergänzendes Messsystem zu GNSS eine inertielle Messeinheit. Detaillierte Ausführungen darüber können in [NOU-06], [URLa-15], [URLa-07], [URLa-14], [URLa-19], [SCHa-09] und [URLa-17] nachgelesen werden.

Inertielle Messtechnik als Backup-System, für den Fall, dass das GNSS-Signal unterbrochen wird, wurde beispielsweise in [URLa-10] eingesetzt.

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass sich inertielle Messeinheiten und die damit verbundenen Relativmessungen hervorragend als Ergänzung zu den Absolutmessungen eignen. Allerdings spielt bei hochgenauen Systemen der Kostenfaktor eine nicht unbedeutende Rolle. Bezüglich Rasenmäher-Roboter kommen vor allem inertielle Messsysteme, die mit der MEMS-Technologie realisiert und wesentlich kostengünstiger sind, als Ergänzungssysteme durchaus in Frage.

Im nächsten Subkapitel werden daher weitere alternative Positionierungstechniken auf ihre Eignung für Rasenmäher-Roboter untersucht.

7.1.4 Alternative Positionierungstechniken

Dieses Kapitel widmet sich vier alternativen Positionierungstechniken, die möglicherweise im Bereich intelligenter Rasenmäher-Roboter eingesetzt werden können. Während die ersten drei behandelten Methoden bereits bei mobilen Robotern eingesetzt wurden, ist die Positionierung mittels Tachymeter, soweit dem Autor bekannt, noch nicht in diesem Kontext berücksichtigt worden.

- Ultraschallmethoden

Ultraschallsensoren stellen meist eine kostengünstige Methode zur Positionierung und Positionsverfolgung von mobilen Robotern in einer bekannten Umgebung dar. Minimal werden drei Sensoren benötigt, wobei ein Sensor auf dem Roboter montiert ist und die anderen zwei an zwei fixen, koordinativ bekannten Punkten aufgestellt sind. Zur zweidimensionalen Positionsbestimmung wird das Trilaterationsverfahren angewandt. Dabei werden mit Hilfe zweier gemessener Strecken (s_1 und s_2) innerhalb eines Messdreiecks Punktkoordinaten mittels Bogenschnittmethode (siehe Abb. 44) bestimmt. Da nach der Messung alle drei Seitenlängen bekannt sind, können mittels Halbwinkelsätze die zwei Innenwinkel α und β bestimmt werden. Mit einem dieser Winkel kann der Winkel (v_1 und v_2) der Strecken (s_1 und s_2) berechnet werden, da der Winkel v_D bekannt ist. In Abb. 44 ist dies exemplarisch für den Winkel v_1 dargestellt. (vgl. [URLa-24]).

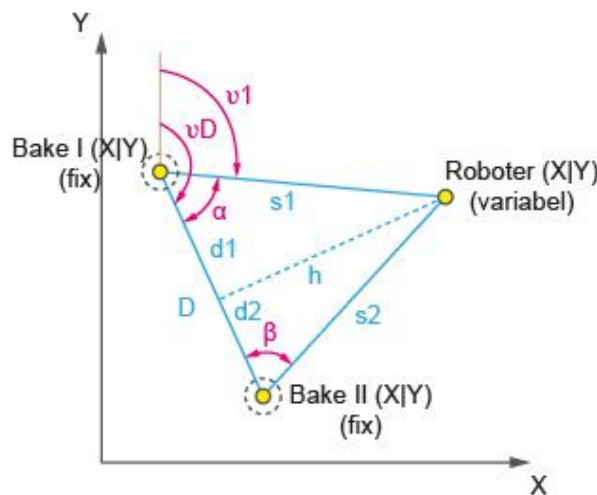


Abb. 44: Vereinfachte Darstellung zur zweidimensionalen Positionsbestimmung mittels Trilateration

Die Messung der Distanz erfolgt, ähnlich wie bei GNSS, mittels Laufzeitmessung der ausgesendeten Ultraschallsignale. Je größer die Distanz zwischen den fix montierten Funkbaken ist, desto größer der Temperatureinfluss, da sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls pro Grad Celsius um annäherungsweise 0,18 % verändert. Bei größerem Abstand ergibt sich dadurch theoretisch eine größere Abweichung (vgl. ebd.).

Durch die Verwendung mehrerer Funkbaken kommt es zu einer Überbestimmung der Position. Diese garantiert zum einen eine höhere Genauigkeit, da auf mehrere Messungen zurückgegriffen werden kann und zum anderen eine höhere Zuverlässigkeit, da bei Signalunterbrechungen zwischen einer Funkbake und dem Roboter ein anderes Signal verwendet werden kann, wobei ein neues Messdreieck aufgezogen wird. Kurzzeitige Unterbrechungen können z.B. durch Menschen hervorgerufen werden, die sich innerhalb der Arbeitsfläche des Roboters frei bewegen (vgl. ebd.).

In einem Experiment von J. D. BJERKNES et al. (ebd.) vom Bristol Robotics Laboratory wurden acht Funkbaken zu einem gleichmäßigen Achteck, ähnlich einem Stoppschild, aufgestellt. Die Distanz zwischen den jeweils gegenüberliegenden Seiten betrug 9,16 Meter. Innerhalb dieser Versuchsfläche befand sich ein mobiler Roboter, dessen Lagegenauigkeit im Subzentimeterbereich bestimmt werden konnte.

Ein derartiger Genauigkeitsbereich entspricht den Ansprüchen intelligenter Rasenmäher-Robotersysteme. Dennoch werden oftmals bei Entwicklungen von entsprechenden Prototypen auf andere Technologien gesetzt. Dies kann möglicherweise auf die geringe Robustheit von Ultraschallsensoren gegen äußere Einflüsse zurückgeführt werden.

- Global System for Mobile (GSM)

Eine weitere Alternativmethode zur Positionsbestimmung ist jene mittels GSM (Global System for Mobile)-Technologie, wobei grundsätzlich zwei Arten unterschieden werden können: Cell-ID and Timing Advance (TA) und Enhanced Observed Time Difference (EOTD). Beide Verfahren verwenden mehrere Basisstationen. Bei ermittelten Lagegenauigkeiten von ca. 30 bis 500 Meter scheiden jedoch beide Methoden für die Positionierung von Rasenmäher-Robotern aus, weswegen auf die erwähnten Methoden, unter Verweis auf die angegebene Quelle, nicht weiter eingegangen wird (vgl. [URLb-07]).

- Wi-Fi Positioning System (WPS)

Weitaus bessere Resultate liefern Positionsbestimmungen mittels WLAN (Wireless Local Area Network). Dazu sind koordinativ bekannte WLAN-Hotspots notwendig, wobei über Signalintensitätsmessungen lediglich Lagegenauigkeiten von bis zu 20 Metern erreicht werden können. Aus diesem Grund kommt der Einsatz eines WPS im Bereich von Rasenmäher-Robotern ebenfalls nicht in Frage (vgl. ebd.).

- Tachymeter

Mit Hilfe zielverfolgender Tachymeter ist es möglich, 3D-Echtzeitdatenerfassungen im Millimeterbereich zu gewährleisten. Diese werden in erster Linie für hochpräzise geodätische Vermessungen, z.B. im Straßen- oder Tunnelbau, eingesetzt und wurden, soweit dem Autor bekannt, noch nicht im Bereich der Robotik getestet.

Erste Ansätze dieser Vermessungsweise gehen bereits auf die 80er Jahre des letzten Jahrhunderts zurück. Im Laufe der Zeit entwickelten mehrere, namhafte Hersteller zielverfolgende Tachymeter, wodurch unterschiedliche Bezeichnungen und diffuse Synonyme entstanden. In [URLa-25] wird diesbezüglich auf das lokale Positionierungssystem (LPS) von Topcon, das Tachymeter Positionierungssystem (TPS) von Leica, die universale Total Station (UTS) von Trimble und auf die Robot Total Station (RTS) von Sokkia verwiesen.

Moderne Tachymeter bestehen aus einer Vielzahl an Messinstrumenten zur Bestimmung sphärischer Polarkoordinaten. Neben der Ermittlung der Distanz und des Horizontal- bzw. Vertikalwinkels muss die automatische Zielverfolgung gewährleistet sein. Das Messinstrument kann mittels GNSS-Technologie eingemessen oder über einem koordinativ bekannten Punkt aufgestellt werden. Der Winkel zwischen dem Messgerät und dem dynamischen Element wird ständig erfasst, wobei bereits kleinste Abweichungen registriert werden. Diese Informationen werden zur Steuerung der Motorik eingesetzt, wodurch das Ziel, bei gleichzeitiger Distanzmessung mittels Lasertechnologie, verfolgt werden kann. Das dynamische Element ist dafür mit einem Retro-Reflektor ausgestattet, der den Laser zurück zu seiner Quelle am Tachymeter reflektiert. Eine detaillierte Systembeschreibung ist beispielhaft für den Leica TPS1200+ in [URLa-25] nachzulesen. Dieses Messgerät ermöglicht kinematische Messungen im Subzentimeterbereich bei einer Entfernung von bis zu 50 Metern (vgl. ebd.).

Anhand des Beispiels konnte gezeigt werden, dass zielverfolgende Tachymeter für den Anwendungsbereich von Rasenmäher-Robotern durchaus geeignet sind. Da diese Messinstrumente relativ teuer sind, ist eine mögliche Implementierung in intelligenten Rasenmäher-Robotersystemen, in Hinsicht auf den Massenmarkt, jedoch unwahrscheinlich. Kostengünstigere Methoden basieren auf SLAM- (Simultaneous Localization and Mapping) Verfahren, die Inhalte des nächsten Kapitels sind.

7.2 SLAM: Simultaneous Localization and Mapping

Dieses Subkapitel bildet nicht nur physisch, sondern auch inhaltlich eine Verbindung zwischen den Bereichen der Datenerfassung (siehe Kapitel 7) auf der einen Seite und der Navigation (siehe Kapitel 8) auf der anderen. Bei SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)-Verfahren verschmelzen diese beiden Bereiche untrennbar miteinander. Derartige Ansätze sind nicht neu. Seit rund zwei Jahrzehnten sind diese Gegenstand der Forschung, wobei jedoch erst in den letzten vier bis fünf Jahren erfolgsversprechende Entwicklungen erzielt werden konnten (vgl. [SOL-12]). Somit ist an dieser Stelle festzuhalten, dass SLAM-Systeme noch nicht in angemessener Art und Weise ausgereift sind.

Bevor jedoch die SLAM-Methoden untersucht werden können, ist es notwendig die zugrunde liegende Dualität der Kartierung und Lokalisierung kurz zu thematisieren.

- Dualität der Kartierung und Lokalisierung

Kartierung und Lokalisierung entsprechen zwei Bereichen, die nicht voneinander getrennt werden können (siehe Abb. 45, n. S.). Ihre gegenseitige Abhängigkeit verschmilzt innerhalb der SLAM-Technologie.

Während die Kartierung das ausgearbeitete Ergebnis der Datenerfassung ist, ist die Lokalisierung ein Teilbereich der Navigation. Beide Segmente beeinflussen einander. Zur

Erinnerung: Es liegen zwei grundlegende Navigationsprobleme für Roboter vor. Die Positionsverfolgung und die Globale Positionierung, inkl. dem Kidnapped Robot Problem. Die Antworten auf diese Fragen werden in Kartenform oder in anderen Ausgabeformen (z.B. numerisch), die wiederum kartiert werden können, dargestellt. D. SOLNAKI et al. halten diesbezüglich fest: *"Since localization requires a map and mapping requires known pose, there is a - chicken and egg - problem. Which comes first?"* ([SOL-12], S. 268). Die Antwort auf dieses Problem ist, dass beide Bereiche gleichzeitig ausgeführt werden müssen. Das bedeutet, dass während der Kartenerstellung simultan die aktuelle Position des Roboters geschätzt werden muss. Dieser Prozess ist in der Fachwelt als SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) bekannt (vgl. ebd.).

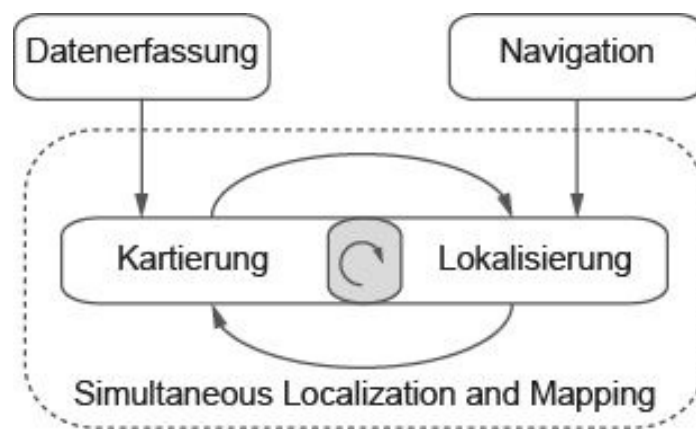


Abb. 45: Dichotomie zwischen Kartierung und Lokalisierung

- SLAM-Systeme

Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) kann als synonym verwendeter Oberbegriff für eine Reihe von unterschiedlichen Verfahren, Methoden und Techniken angesehen werden. Der gemeinsame Nenner findet sich in der Bezeichnung und der dahinterstehenden Bedeutung einer simultanen Lokalisierung und Kartierung. Innerhalb dieses Pools an Verfahren können zwei große Gruppen im Bereich der Robotik unterschieden werden, die beide bildgebend sind. Zum einen handelt es sich um laserbasierte Systeme. Beispiele dafür sind in [LUC-10] und [XIE-10] nachzulesen. Zum anderen gibt es kamerabasierte bzw. visuelle Systeme. Ansätze dafür sind unter anderem in [CHO-11], [BAD-12], [LEE-12], [SOL-12], [YI-12], [ROM-12] und [SCHc-12] beschrieben.

Welche der beiden Systeme bessere Ergebnisse liefert, kann nicht so einfach gesagt werden. R. LUCA et al. vertreten folgende Meinung: *"... laser scanners have the advantage of producing reliable data with well understood characteristics for map generation."* ([LUC-10], S. 265). Tatsächlich ist die unmittelbare Umgebung ausschlaggebend für die Qualität des Ergebnisses. Unter Umständen können Low-Cost kamerabasierte Systeme

(z.B. mittels Webcams), in einer wenig komplexen Umwelt, qualitativ vergleichbare Ergebnisse liefern wie z.B. Systeme, die teure Laserscanner verwenden. Diesbezüglich ist, soweit dem Autor bekannt, noch kein direkter Vergleich der beiden Systeme unter gleichen Bedingungen durchgeführt worden.

- Allgemeine Verfahrensweise von SLAM-Systemen

Unabhängig vom zugrundeliegenden System ist die Verfahrensweise bei fast allen recherchierten Ansätzen nahezu ident. J. XIE et al. verweisen diesbezüglich auf vier Prozessstufen, wobei SLAM die erste Stufe darstellt. Daraufhin folgen der Kartenabgleich, die Positionsverfolgung und die Qualitätskontrolle.

Im ersten Schritt wird der Roboter in eine ihm unbekannte Umgebung gebracht, wo er diese selbstständig oder ferngesteuert mit den bildgebenden Sensoren erkundet. In fixen Abständen werden Aufnahmen gemacht und dabei, z.B. mittels GPS, die Koordinaten des aktuellen Standortes ermittelt. Bei diesem Prozess, der auch iterativ durchgeführt werden kann, wird eine Referenzkarte erstellt. Je nach Systemausführung können dabei, unter Einsatz bestimmter Filter, (teil-)automatisch Landmarken, wie z.B. Büsche, Wege, usw. extrahiert oder im Fall von laserbasierten Systemen, Punkte zu Linien zusammengefasst werden. Dadurch kann die Datengröße wesentlich reduziert werden, was wiederum eine schnellere Prozessverarbeitung in Echtzeit ermöglicht (vgl. [XIE-10], [BAD-12] u. [LUC-10]). In Abhängigkeit vom System kann es außerdem möglich sein, im Nachhinein topologische Informationen zu adaptieren. Beschrieben sind dementsprechende Beispiele in [BAD-12] [ROM-12].

H. CHOI et al. halten betreffend der Anzahl an Landmarken fest, dass diese abhängig von der Umgebung sei. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass bei zu vielen Landmarken eine eindeutige Identifizierung schwierig sein kann. Sind die Landmarken jedoch zu weit gestreut, können ebenfalls Schwierigkeiten im Zuge der Lokalisierung auftreten (vgl. [CHO-11]).

Nachdem die Referenzkarte erstellt wurde, ist der Roboter im Grunde einsatzfähig, wobei dessen Ausgangs- bzw. Startpunkt, beliebig innerhalb der aufgenommenen Fläche gewählt werden kann. Mit Hilfe der Sensoren wird die Umgebung erneut aufgenommen, wobei das Ergebnis gefiltert und anschließend mit der Referenzkarte mittels geeigneter Algorithmen verglichen wird. Dieser Prozess wird als Kartenabgleich (en. image matching) bezeichnet. Anhand des Vergleichs erhält der Roboter Informationen über seinen initialen Standort, wodurch das Problem der globalen Lokalisation gelöst werden kann. Anschließend kann der Roboter seine vordefinierte Navigationsstrategie verfolgen, wobei dessen Position fortlaufend, relativ zur Ausgangsposition, verfolgt wird. Dieser Prozess wird häufig als "local SLAM" bezeichnet (vgl. [XIE-10]).

- Probleme von SLAM-Systemen

Das grundlegende Problem ist, dass der aktuelle Standort nicht direkt erfasst wird, sondern mit Hilfe von rauschbehafteten Sensoren. Die Position wird von den aufgenommenen Daten abgeleitet und somit lediglich indirekt bestimmt, wodurch eine zusätzliche Fehlerquelle vorliegt (vgl. [SOL-12]).

Andere Probleme können unter anderem dann auftreten, wenn zwischen dem Roboter und dem zu scannenden bzw. aufzunehmenden Objekt eine dynamische oder statische Sichtbarriere auftaucht (vgl. [LUC-10]). Im ersten Fall kann es sich dabei z.B. um einen Mensch handeln, der die Wege des Roboters kreuzt. Der Roboter ist dann angewiesen, das Mähen vorübergehend einzustellen und nach einer festgelegten Zeit eine neue Aufnahme bzw. einen neuen Scan zu machen. Im zweiten Fall kann es sich um Objekte handeln, die nach der Erstellung der Referenzkarte in die Umgebung integriert wurden, wie z.B. ein Gartenstuhl. Handelt es sich dabei um permanente Veränderungen, muss eine Neuinstallation, im Zuge derer eine neue Referenzkarte erstellt wird, durchgeführt werden.

- Genauigkeit von SLAM-Verfahren

Die Theorie, die den SLAM-Verfahren zugrundeliegt scheint, vielversprechend. Allerdings befinden sich die meisten SLAM-Systeme noch in der Entwicklungsphase, weswegen in den einschlägigen Beiträgen zu diesem Thema häufig unscharfe Qualitäts- bzw. Genauigkeitsaussagen wie "effizient" oder "zuverlässig" verwendet werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass derartige Systeme, zurzeit noch zu ungenau für den Einsatz in intelligenten Rasenmäher-Robotersystemen sind.

- SLAM und Rasenmäher-Roboter

Dem Autor sind bis dato keine Prototypen von Rasenmäher-Robotern bekannt, die SLAM-Systeme zur Selbstlokalisierung einsetzen. Allerdings gibt es bereits Beispiele für die Verwendung von bildgebenden Sensoren zur Erkennung von Hindernissen. Diese Tatsache lässt Grund zur Annahme, dass, wenn ausgereifte SLAM-Verfahren zur Verfügung stehen, diese auch in absehbarer Zeit für die Lokalisierung und eigentliche Navigation von Rasenmäher-Roboter eingesetzt werden und dadurch eine Alternative zu anderen Methoden darstellen können.

7.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchung unterschiedlicher Datenerfassungsmethoden im Kontext mobiler autonomer (Rasenmäher-)Roboter sind vereinfacht graphisch in Abb. 46 dargestellt, wobei die einzelnen Methoden hinsichtlich ihrer Lagegenauigkeit und ihrer Eignung für Echtzeitanwendungen sowie des jeweils vorliegenden Kostenfaktors vergleichend gegenübergestellt sind.

Methoden	Lagegenauigkeit	Realtime	Kostenfaktor
GNSS		●●●	●●●
dGNSS (realtime)	●●	●●●	●●
dGNSS (post processing)	●●●		●●
RTK-GNSS	●●●	●●●	●
Kartenextraktion			●●●
IMU	●●	●●●	●
Ultraschall	●●●	●●●	●●●
GSM		●●●	●●●
WPS		●●●	●●●
Tachymeter	●●●	●●●	●
SLAM (laser)		●●●	●
SLAM (kamera)		●●●	●●●

Abb. 46: Datenerfassungsmethoden im Vergleich

Die Untersuchung kam unter anderem zu dem Ergebnis, dass GNSS-Technologie, basierend auf absoluter Messtechnik, mit einem Genauigkeitsbereich von fünf bis zehn Metern in der Lage zu ungenau für Rasenmäher-Anwendungen ist. Allerdings wäre ein Einsatz als Backup-System für großflächige Sport- oder Parkanlagen denkbar. Mit Hilfe des relativen Messtechnik-Pendants, in Form von dGNSS oder RTK-GNSS, kann in Echtzeit der geforderte Genauigkeitsbereich im Subzentimeterbereich erreicht werden. Ein derartiges System kann durch eine inertielle Messeinheit gut ergänzt werden, wobei der Kostenfaktor abzuwägen ist. Post Processing dGNSS eignet sich hingegen hervorragend für die Ermittlung von Fixpunkten, z.B. für Start- oder Grenzpunkte.

Die Informationsextraktion aus großmaßstäbigen Karten stellt zwar eine kostengünstige Alternative dar, ist für den praktischen Echtzeiteinsatz jedoch nicht geeignet und ist mit einem Lagegenauigkeitsbereich von maximal einem Meter nicht konkurrenzfähig.

Ultraschallmethoden liefern eine Subzentimetergenauigkeit, sind jedoch wenig robust gegen äußere Einflüsse. Da diese jedoch kostengünstig und für den Echtzeiteinsatz geeignet sind, können diese Methoden als Ergänzungs- oder Backup-System, vor allem bei kleineren Anlagen, in Betracht gezogen werden.

GSM und WPS-Technologie ist hingegen im Rasenmäher-Anwendungsbereich zu ungenau (30-500, bzw. 20 Meter in der Lage), anders als Echtzeit-Tachymetersysteme, die jedoch wahrscheinlich zu teuer für den Massenmarkt und im Grunde für geodätische Anwendungen ausgelegt sind. SLAM-Methoden könnten hingegen in absehbarer Zukunft eine zentrale Rolle im Bereich von Rasenmäher-Roboter einnehmen. Derzeit scheinen die ersten Prototypen jedoch zu ungenau zu sein. Im Vergleich von laser- und kamerabasierten SLAM-Systemen ist der große Preisunterschied von entscheidender Bedeutung.

Nachdem unterschiedliche Datenerfassungsquellen und -methoden untersucht wurden, geht das folgende Kapitel einen Schritt weiter, in dem untersucht wird, wie die erhobenen Daten in Navigationssystemen und -strategien einfließen können.

8 STATE OF THE ART II - NAVIGATIONSSYSTEME UND -STRATEGIEN IM KONTEXT MOBILER, AUTONOMER ROBOTER

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit unterschiedlichen Navigationssystemen und -strategien in Bezug auf mobile, autonome Roboter, wobei jene im Kontext von Rasenmäher-Robotern speziell im Vordergrund stehen.

Zu Beginn des Kapitels werden zwei verschiedene Methoden zur Begrenzung der zu mähenden Fläche untersucht, da eine sichere und kollisionsfreie, autonome Navigation feste Grenzen verlangt. In den darauffolgenden zwei Kapiteln werden zwei Navigationsweisen untersucht, zum einen die grundlegende Koppelnavigation und zum anderen Pfadplanungsstrategien (en. path planning). Im Anschluss daran werden vier unterschiedliche Methoden und Techniken zur Detektion von statischen und dynamischen Hindernissen (en. obstacle avoidance) sowie den dabei verwendeten Ausweichstrategien, die meistens einen Teilbereich innerhalb des path planning einnehmen, unter die Lupe genommen. Dieses Kapitel endet mit einer Analyse von Navigationsstrategien, die keine Grenzen und keine Obstacle-Avoidance Systeme benötigen, da diese manuell vordefinierte Navigationspfade verwenden. Eine vereinfachende Systemübersicht, inkl. der dazu gehörenden Navigationsstrategien ist graphisch vereinfacht in Abb. 47 dargestellt.

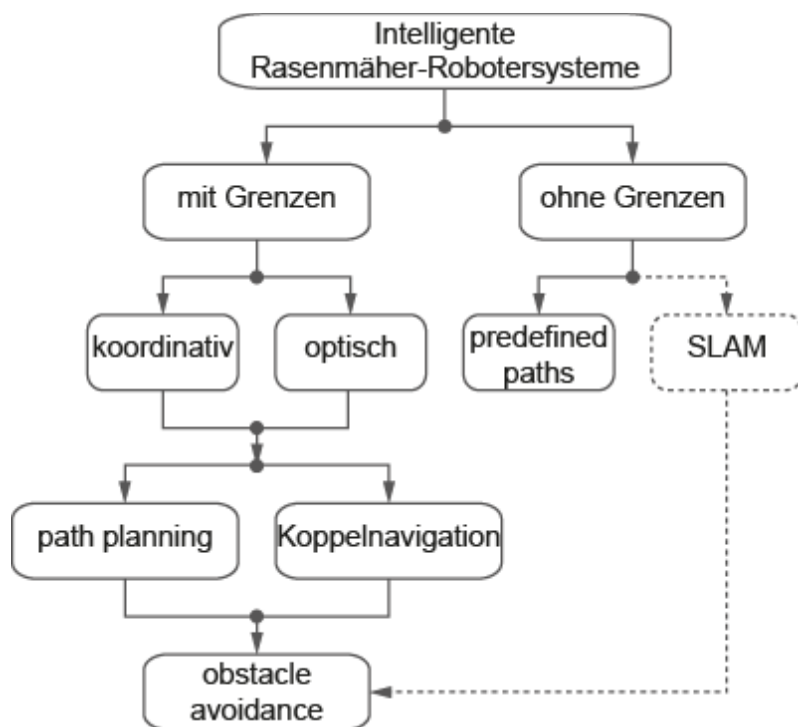


Abb. 47: Intelligente Rasenmäher-Robotersysteme - Übersicht

8.1 Alternative Methoden zur Begrenzung der zu mähenden Fläche

Dass die Begrenzungsmethode unter Zuhilfenahme von Induktionsschleife, zwar zielführend, jedoch auch im großen Maße ineffizient ist, konnte in dieser Arbeit bereits gezeigt werden (siehe Kapitel 4). Dies wurde zudem von den befragten Experten größtenteils bestätigt (siehe Kapitel 6). Im Zuge der Untersuchung dieses Themenkomplexes kristallisierten sich zwei vielversprechende Alternativen heraus, die in weiterer Folge kurz vorgestellt werden.

8.1.1 Grenzziehung mit Hilfe koordinativ bekannter Punkte

Die erste Alternative zur Methode mittels Induktionsschleifen ist die Verwendung von koordinativ bekannten Punkten, mit denen der Arbeitsbereich von Robotern begrenzt werden kann. Zur Positionsbestimmung einzelner Punkte eignen sich mehrere Verfahren (siehe Kapitel 7). Grundsätzlich können zwei verschiedene Ansätze unterschieden werden. Entweder werden dem Robotersystem aus vorangegangenen Messungen präzise Koordinaten der Grenzpunkte bzw. -linien übertragen oder der Roboter erfasst semi- oder vollautomatisch die erforderlichen Daten, z.B. mit Hilfe einer dGNSS-Einheit, selbst, wobei die Genauigkeit der verwendeten Methode (vgl. Kapitel 7) eine entscheidende Rolle einnimmt.

Die Entwickler des "InstiGator" ([URLa-06] u. [URLa-20]) von der University of Florida entschieden sich für die erste Variante und entwickelten eine Software, bei der über ein Graphical User Interface (GUI) die Koordinaten der Eckpunkte der zu mähenden Fläche eingegeben werden können (siehe Abb. 48).

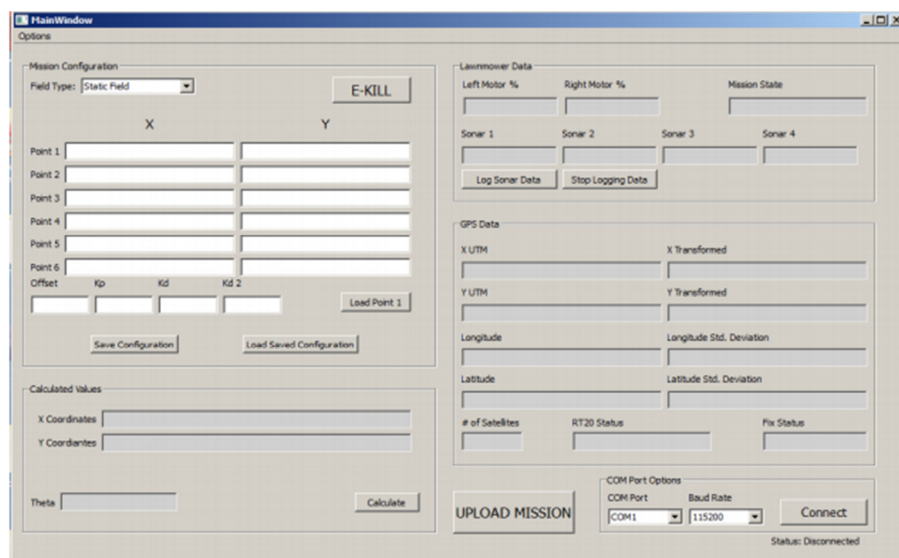


Abb. 48: Eingabe von Grenzpunktkoordinaten über ein Graphical User Interface

Quelle: [URLa-20]

Die zweite Variante entspricht quasi einer All-in-One Lösung, da zur Installation lediglich der Rasenmäher-Roboter, jedoch keine weiteren externen Geräte oder Daten erforderlich sind. Der Roboter wird dabei im Zuge der Installation meist ferngesteuert, seltener automatisch mittels SLAM-Technik, entlang der bestehenden Grenzen geführt, wobei in bestimmten Abständen dreidimensionale, geometrische Koordinaten aufgenommen und anschließend zu Grenzlinien interpoliert werden. Oftmals kommt es währenddessen zu einer Vereinfachung auf die zweidimensionale Ebene. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass fortlaufend so genannte GNSS-Tracks aufgezeichnet werden. Beispiele für Rasenmäher-Roboter, die auf dieser Installationsweise basieren, sind sowohl in [SHI-08], als auch in [HSU-10] beschrieben.

Die Grenzen sind dem Roboter während des Mähprozesses ständig bekannt, da diese im System gespeichert sind. Ausgehend von einem weiteren koordinativ bekannten Punkt, startet der Rasenmäher-Roboter seine Arbeit innerhalb der festgelegten Grenzen. Da dabei die aktuelle Position fortlaufend erfasst wird, kann gleichzeitig festgestellt werden, ob sich der Rasenmäher-Roboter innerhalb oder außerhalb der zu mähenden Fläche befindet. Meistens wird dabei eine Art Grenzstreifen in Form einer negativen Pufferzone (en. Buffer) definiert. Erreicht der Roboter diesen Bereich, wird, je nach Navigationsstrategie, ein Richtungswechsel initiiert und somit ein Grenzübertritt verhindert.

8.1.2 Optische Linien zur Begrenzung der zu mähenden Fläche

Eine weitere alternative Begrenzungsmethode basiert auf optischen Linien, in Form von aufgetragenen Kalk- bzw. Farblinien oder Steinplatten u.dgl., die über Kameras detektiert werden. Beispiele, die auf diesem Ansatz basieren, können in [SCHa-09] und [URLa-03] nachgelesen werden.

Die Verwendung optischer Linien zur Feldbegrenzung wurde auch im Roboter-Fußballbereich erfolgreich getestet (vgl. [TSA-11]). Ähnliche Beispiele sind des Weiteren im Bereich der Staubsauger-Roboter bekannt. Im Unterschied dazu kommt es im typischen Anwendungsbereich von Rasenmäher-Robotern jedoch zu einer zusätzlichen, potentiellen Fehlerquelle, da, anders als in einer Halle oder einem Raum, wechselnde Lichtverhältnisse auftreten können. Aus diesem Grund ist der RGB-Farbraum für die Detektion von optischen Linien eher ungeeignet, weswegen A. SCHEPELMANN et al. (vgl. [SCHa-08]) bei ihrem Prototyp namens "CWRU Cutter" den HSV-Farbraum verwendeten, wobei über eine Kalman-Filterung des Farbtons und der Sättigung eine weiße Begrenzungslinie in 84 Prozent aller Fälle eindeutig identifiziert werden konnte. Bei zu starker Sonneneinstrahlung führte das System jedoch zu Fehlern, da die gesamte Grasfläche als "weiß" interpretiert wurde. Der "Mini-Mow" der Cedarville University (vgl. [URLa-03]) verwendet ebenfalls den HSV-Farbraum zur Detektion weißer Linien. Abb. 49 stellt diesbezüglich die einzelnen Extraktionsschritte dar.

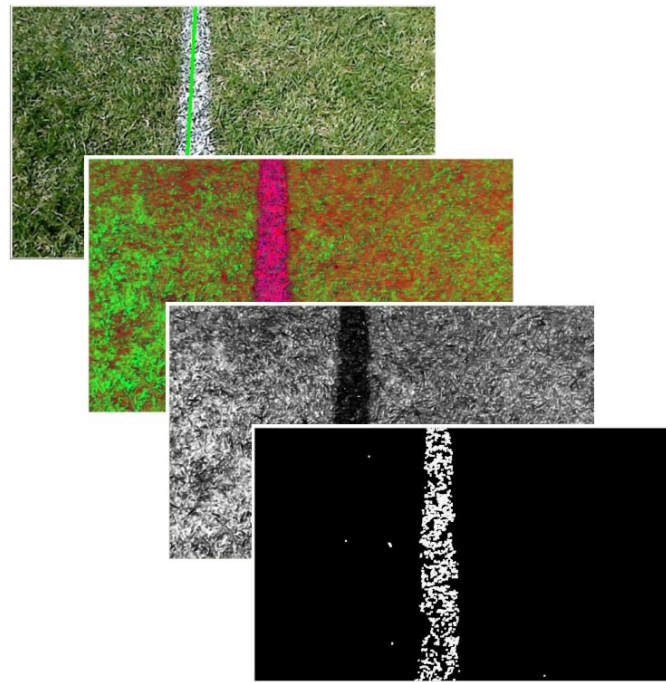


Abb. 49: Abfolge der Extraktion einer weißen Begrenzungslinie
Quelle: [URLa-03], modifiziert

Das erste Image, das sich auf der untersten Bildebene befindet, entspricht der Originalaufnahme im RGB-Farbraum, inkl. einer extrahierten Kante nach einer Hough-Transformation. Darüber befindet sich das Originalbild im HSV-Farbraum. Das dritte Bild stellt den Sättigungskanal des HSV-Bildes dar. Das letzte Image entspricht einem Schwellenwertbild nach vollendeter Bildbearbeitung, im Zuge derer Erosions- und Dilatationsfunktionen zur Extraktion angewandt wurden.

L.-S. FU und Y.-Y. XING ([FU-12]) konnten die zugrundeliegende Hough-Transformation in diesem Kontext verbessern (siehe Abb. 50).

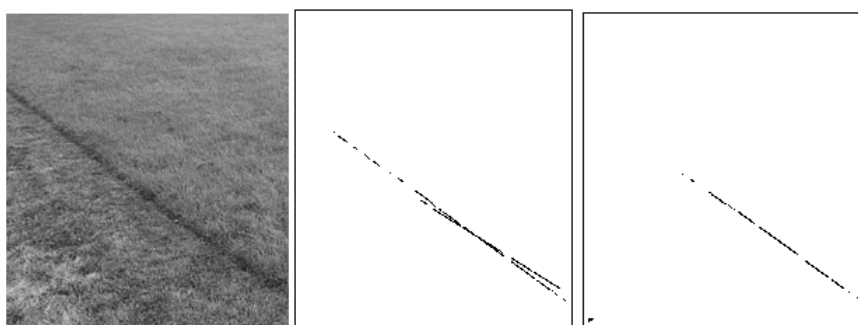


Abb. 50: v.l.n.r. Graustufenbild, Hough-Transformation, Verbesserte Hough-Transformation
Quelle: [FU-12], modifiziert

Ausgehend von einem 24 Bit Farbbild wurde ein Graustufenbild erstellt. Daraus wurde im nächsten Schritt eine Bitmap (s/w) abgeleitet, die in weitere Folge geglättet wurde.

Im Anschluss daran wurden Kanten extrahiert und eine Hough-Transformation durchgeführt. In Abb. 50 (Mitte) sind dabei zwei Linien zu erkennen. Die Verbesserung der Transformation liegt in der Problemlösung des lokalen Maximums, wodurch extrahierte, kurze verdrehte Geradenstücke nicht berücksichtigt werden.

Im Zuge der Entwicklung des "Autonomous Lawnmower" (vgl. [URLa-04]) der University of North Florida wurden zwei Linien-Detektionssysteme getestet. Kostengünstige Farbsensoren, die das von vier Ultra Bright LEDs ausgehende, am Gras reflektierte Licht aufnehmen, konnten in einer Halle erfolgreich getestet werden. Da der Abstand Sensor-Oberfläche jedoch annäherungsweise 2,55 Millimeter beträgt, ist dieses System für den Outdoor-Einsatz, aufgrund der nicht ebenen Grasoberfläche ungeeignet. Die Verwendung einer Webcam zur Detektion, wurde zwar in Erwägung gezogen, jedoch nicht getestet. Das Entwicklungsteam setzte hingegen auf vier Linescan-Camera-Module, wobei jedes Modul je eine Reihe von 128 Pixel erfassen kann. Zudem wurde festgehalten: *"With the proper algorithms, the linescan modules can also be used to measure height, width, diameter, and thickness; locate objects, lines, edges, gaps, and holes; counts items; measure conveyor coverage; determine volume, shape and orientation; and read barcodes."* (ebd., S. 19) Allerdings wurden diesbezüglich keine Genauigkeitsangaben gemacht.

Aufgrund der Abhängigkeit von sich verändernden Lichtverhältnissen ist diese kostengünstigere Begrenzungsmethode weniger robust als jene mittels koordinativ bekannten Punkten, weswegen weitere Forschungen und Entwicklungen auf diesem Gebiet notwendig sind.

In weiterer Folge werden zwei Navigationsstrategien unter die Lupe genommen, die feste Grenzen benötigen, beginnend mit der Koppelnavigation, die unter Umständen auch ein wesentlicher Bestandteil einer Pfadplanungsstrategie sein kann.

8.2 Methoden der Koppelnavigation

Unter dem Begriff "Koppelnavigation" kann eine fortlaufende Positionsbestimmung, ausgehend von einem bekannten Punkt verstanden werden. Im Zuge dessen werden Ausrichtung, Geschwindigkeit und Zeit gemessen. Es handelt sich dabei um Relativmessungen, deren Genauigkeit über die Zeit hinweg abnimmt. Diese Messgrößen können z.B. mit Hilfe einer inertialen Messeinheit (en. IMU) in Kombination mit einem GNSS bestimmt werden (vgl. Kapitel 7.1.3). Rasenmäher-Roboter-Prototypen, die diesen Ansatz verfolgen, sind in [NOU-06], [URLa-10], [URLa-15] und [URLa-17] beschrieben. Kostengünstigere Alternativen stellen jene Navigationssysteme dar, die auf Odometrie- und Kompassdaten basieren. Beispiele dafür sind in [WAS-11], [SMI-05], [URLa-03], [URLa-16] und [URLa-18] nachzulesen. In [URLa-07], [URLa-14] und [URLa-19] sind Prototypen beschrieben, die beide Techniken innerhalb eines hybrides System verwenden.

Koppel navigationsansätze sind vor allem dann empfehlenswert, wenn zwischen Start- und Endpunkt, in kleinen Abständen Schlüsselpunkte (en. key points), deren Koordinaten bekannt sind, festgelegt werden. Das auf einer inertialen Messeinheit basierende System der Wright State University (vgl. [URLa-10]) konnte auf einer Distanz von zwölf Meter eine angemessene Genauigkeit von zwei Zentimeter aufweisen. Eine vergleichbare Genauigkeit (~ 5 cm, vgl. [SMI-05]) kann ebenfalls mittels Odometer und Kompass erzielt werden, die jedoch weniger robust gegen äußere Einflüsse, wie z.B. bei feuchten oder nassen Untergründen, sind. Im Falle von durchdrehenden Rädern kann es zu größeren Fehlern bei relativen Positionsbestimmungen kommen.

Der "Redblade" der Miami University (vgl. [URLa-14]) ist mit einem hybriden Navigationssystem ausgestattet, wobei Odometrie- und IMU-Daten als Backup-System verwendet werden, bei einem möglichen Ausfall des dGPS. Ein diesbezüglich durchgeführter Vergleichstest ergab, dass die Abweichungen der Odometriedaten vertretbar sind und somit keine nennenswerten Navigationsprobleme auftreten (siehe Abb. 51).

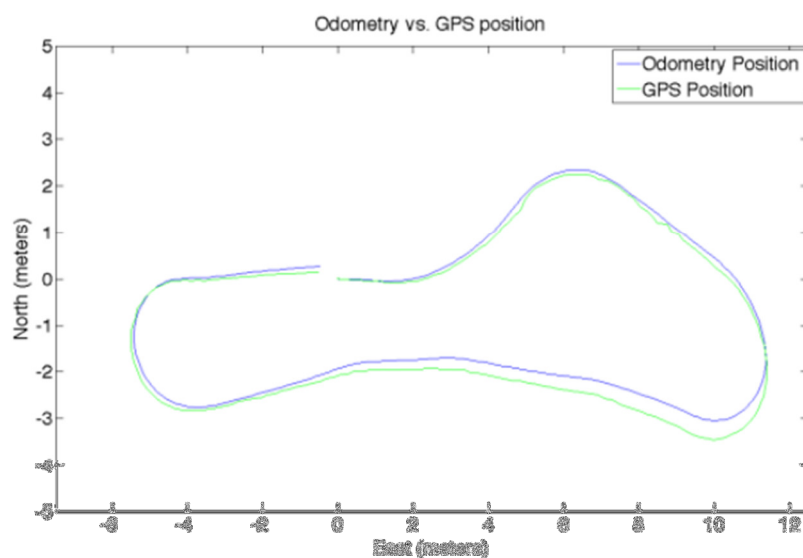


Abb. 51: Vergleich zwischen Odometrie und GPS

Quelle: [URLa-14]

Koppel navigationsansätze im engeren Sinne sind meist ein Teil eines übergeordneten Navigationssystems, da der dahinterstehende Prozess im Grunde eine kontinuierliche Positionsbestimmung ist, jedoch nicht festgelegt wird, welcher Zielpunkt eigentlich angesteuert werden soll. Die Koppelnavigation dient vor allem dazu, den festgelegten Kurs beizubehalten.

Im nächsten Kapitel werden dazu Strategien und Methoden untersucht, die sich unter dem Sammelbegriff "Pfadplanung" mit den Problemen der Zielbestimmung und Fahrtwegermittlung auseinandersetzen.

8.3 Pfadplanungsstrategien für Rasenmäher-Roboter

Der optimale Pfad eines Rasenmäher-Roboters setzt minimale Arbeitszeit bei geringem Energieverbrauch voraus. Dabei muss stets die Sicherheit für den Menschen gewährleistet sein (vgl. [HSU-10]). Idealerweise ermöglichen Pfadplanungsstrategien das Mähen einer Grasfläche, ohne dabei Bereiche doppelt mähen zu müssen, wodurch eine Effizienzsteigerung erzielt werden kann (vgl. [URLa-15]). Im Folgenden werden unterschiedliche Pfadplanungsansätze vorgestellt, die bereits bei Prototypen von Rasenmäher-Robotern zum Einsatz kamen.

8.3.1 Allgemeine Algorithmus-Hierarchie von Pfadplanungsstrategien

In den meisten Fällen liegen Rasenmäher-Robotern umfangreiche Navigationssysteme zu Grunde, bei denen die Pfadplanung nur einen bestimmten Teilbereich einnimmt, der unter Umständen weiter unterteilt werden kann. So unterscheidet das Entwicklungsteam des "UEzMOW 3.1.1" (vgl. [URLa-01]) beispielsweise drei Hierarchieklassen von Algorithmen (siehe Abb. 52), wobei an oberster Stelle Sicherheitsunterbrechungen stehen, für den Fall einer unerwarteten Kollision mit einem Objekt. Auf zweiter Ebene sind Algorithmen zur Hindernisdetektion verankert. Erst danach kommt die eigentlich Mähstrategie in Form eines Pfadplanungsalgorithmus.

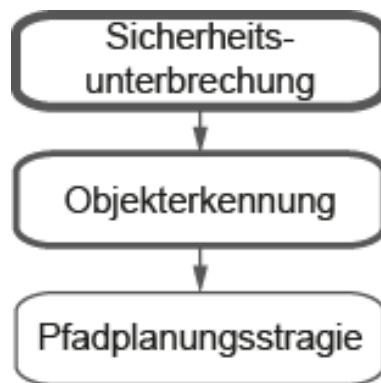


Abb. 52: Algorithmus-Hierarchie eines Rasenmäher-Roboters

Quelle: nach [URLa-01]

Eine allgemein gültige Hierarchie oder Einteilung vorhandener Algorithmen, Methoden oder Strategien gibt es nicht. Ebenso wenig gibt es "das" Pfadplanungssystem, sondern viele, die unterschiedliche Charakteristika aufweisen, aufgrund der Implementierung verschiedener Techniken. Die meisten Rasenmäher-Roboter, die zurzeit im wissenschaftlichen Bereich entwickelt werden, weisen jedoch eine ähnliche Gewichtung der Prioritäten auf, wie jene, die durch die in Abb. 52 dargestellte Algorithmus-Hierarchie widerspiegelt wird.

8.3.2 Vergleich unterschiedlicher Mähmuster und -strategien

Die meisten herkömmlichen Rasenmäher-Roboter, die aktuell zum Verkauf stehen, mähen den Rasen nach einem zufälligen Muster (siehe Abb. 6). Ein derartiges System ist einfach zu realisieren und ist im Vergleich kostengünstig. Diese preiswerten Systeme sind in der Regel jedoch wenig effizient. Andere sind jedoch in der Lage, den Rasen nach einem bestimmten Muster zu mähen, z.B. jenes des CWRU Teams, das die Global Mapping Method verwendet. Allerdings verschlingt dieses System rund 25.000 \$, wenn ein angemessenes Genauigkeitsmaß erzielt werden soll (vgl. [URLa-07]).

Zwischen diesen beiden Extremen gibt es jedoch Alternativen, wie z.B. die Strategie von A. CASH et al. (ebd.), die dem "SUMo" (Syracuse University Mower) zugrunde liegt und in Abb. 53 dargestellt ist.

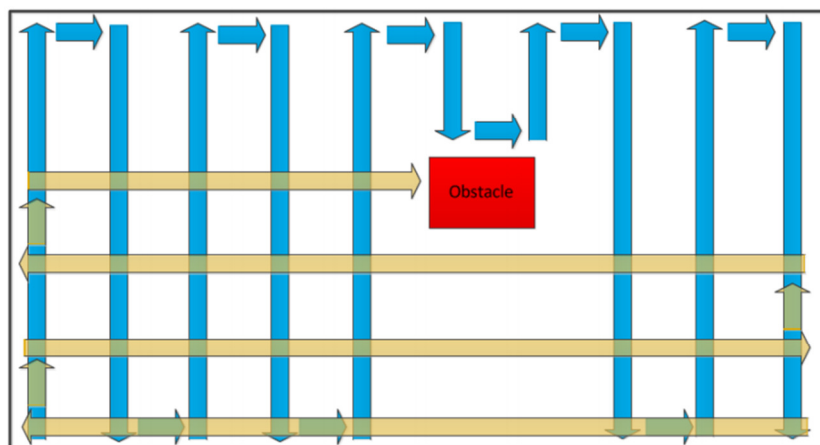


Abb. 53: Pfadplanungsstrategie des "SUMo" Rasenmäher-Roboters

Quelle: [URLa-07]

Der "SUMo" bewegt sich linear über das zu mähende Feld und wendet um 180° , wenn eine vorprogrammierte Grenze erreicht wird. Trifft der Rasenmäher innerhalb der Fläche auf ein Hindernis, so kommt es ebenfalls zu einer Umkehrung, wobei an dieser Stelle Koordinaten aufgenommen werden. In Abb. 53 ist außerdem zu sehen, dass bestimmte Bereiche doppelt gemäht werden, was wiederum zu einem unnötigen Energieverbrauch führt. Somit handelt es sich hierbei nicht um ein vollausgereiftes System. Im direkten Vergleich zum Mähmuster herkömmlicher Rasenmäher-Roboter handelt es sich jedoch um eine wesentliche Verbesserung und Effizienzsteigerung.

Eine weitaus bessere Lösung bietet der "UEzMOW 3.1.1" der University of Evansville ([URLa-01]). In Abb. 54 ist dessen so genannter Farming-Algorithmus graphisch vereinfacht dargestellt. Trifft der Rasenmäher-Roboter auf ein Hindernis oder eine zuvor festgelegte Grenze, vollführt dieser ebenfalls eine 180° Drehung. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange bis ein statisches Hindernis auftaucht. Handelt es sich dabei um ein freistehendes

Objekt, mäht der Roboter im Anschluss auch den Rasen auf der Rückseite, bevor der eigentliche Pfad wieder aufgenommen wird (vgl. ebd.).

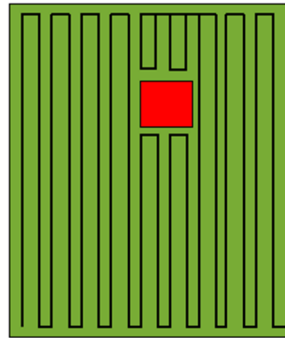


Abb. 54: Farming Algorithmus des UEzMOW 3.1.1

Quelle: [URLa-01]

Die Auburn University verfolgt einen ähnlichen Ansatz (vgl. [URLa-12]) und vergleicht diesen mit dem Pflügen eines Feldes, aufgrund der parallelen Anordnung der Navigationspfade (siehe Abb. 55).

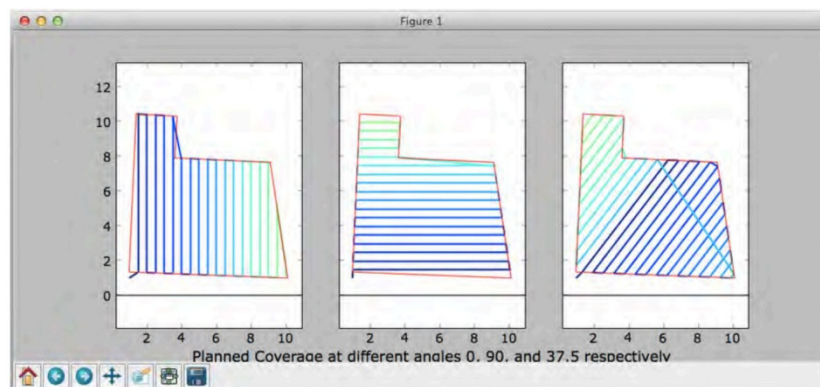


Abb. 55: Boustrophedon-Path Mähmuster des Auburn University Robotic Lawnmower

Quelle: [URLa-12]

Ausgangspunkt dafür sind koordinativ bekannte Grenzpunkte bzw. -linien. Über eine eigens dafür entwickelte Software kann ein bestimmter Pfad, der aus einer Vielzahl an way points besteht und zu einer Linie interpoliert wird, generiert werden. Diese können in unterschiedlichen Ausrichtungen erstellt werden. Hindernisse werden dabei nicht berücksichtigt, sondern werden im Feld vom Roboter erkannt, wobei eine bestimmte Ausweichstrategie angewendet wird (vgl. ebd.). Mehr dazu im Kapitel 8.4.

Die meisten entwickelten Pfadplanungsstrategien basieren auf parallelen Linien. Dies ist verständlich, da die meisten Grundstücke Ecken und gerade Kanten aufweisen. Selten lassen sich Strategien finden, die die Rasenfläche nach konzentrischen Kreisen oder anderen Mustern mähen, da diese schwerer realisierbar sind.

8.3.3 Normalisierung der Ausrichtung zur Leistungssteigerung

Bei den meisten im wissenschaftlichen Bereich entwickelten Rasenmäher-Robotern kommt es zu einer Vereinfachung der dreidimensionalen Welt auf einen zweidimensionalen Ausschnitt, der wiederum weiter zur Leistungssteigerung des Verarbeitungsprozesses manipuliert werden kann. Bei etwaigen Manipulationen handelt es sich meist um eine Drehung des lokalen Koordinatensystems um die X-Achse, sodass die Navigationspfade parallel zu den Koordinatenachsen ausgerichtet sind (siehe Abb. 56).

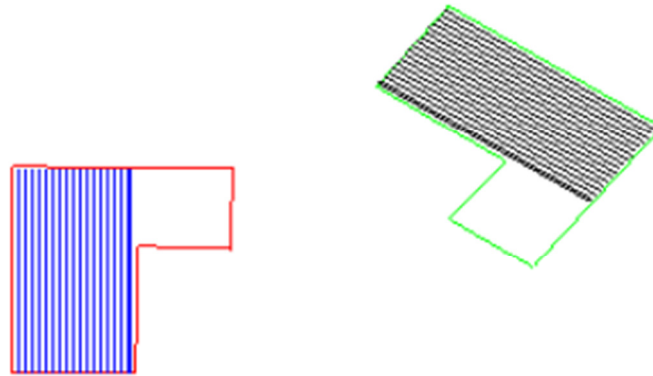


Abb. 56: Vereinfachung des Verarbeitungsprozesses durch Rotation der Fläche
Quelle: [URLa-20], modifiziert

Mit Hilfe dieser Manipulation müssen nur noch Abweichungen auf einer Koordinatenachse, entlang des Pfades, überprüft und gegebenenfalls, z.B. mit Hilfe eines Koppelnavigationssystems, bereinigt werden. Dieser Ansatz liegt unter anderem dem "InstiGator" der University of Florida (vgl. [URLa-06] u. [URLa-20]) und dem "Moogie" der Wright State University (vgl. [URLa-17]) zu Grunde. Abb. 57 veranschaulicht diesbezüglich das so genannte Normalisierungsprinzip von "Moogie". Nach der Manipulation führt der Hauptpfad des Rasenmäher-Roboters bei konstantem X-Wert stets Richtung 0° (Künstlich Nord).

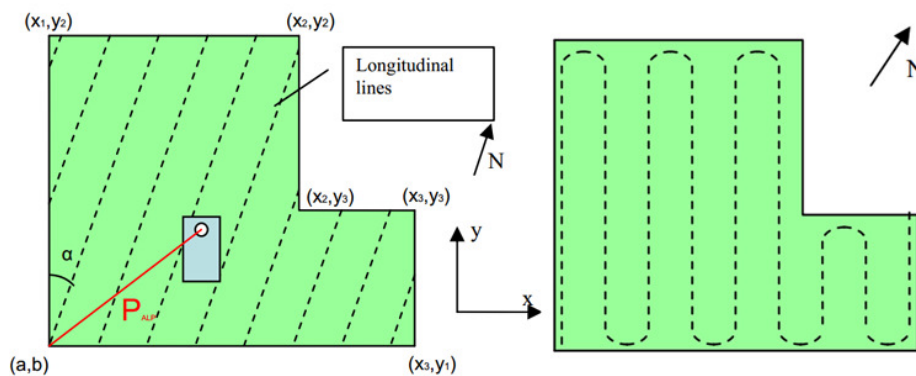


Abb. 57: Normalisierung der Ausrichtung
Quelle: [URLa-17], modifiziert

8.3.4 Mehrstufiger Pfadplanungsalgorithmus

Ein Beispiel dafür, dass der Pfadplanungsalgorithmus weiter unterteilt werden kann, zeigt der "A.W.S.U.M.M.O.W." (Autonomous Wright State Mower Mows Outstandingly and Wonderfully) (vgl. [URLa-10] u. [URLa-21]). Hinter dieser kreativen Modellbezeichnung steckt ein ausgeklügeltes Rasenmäher-Robotersystem, wobei der Pfadplanungsalgorithmus aus sieben Stufen besteht, die in weiterer Folge kurz beschrieben werden, um einen Überblick über die Vielfältigkeit derartiger Systeme zu geben.

Mit Hilfe von zwei aufgenommenen GPS-Punkten wird im Zuge der "Kalibrierung" zunächst ein lokales, kartesisches Koordinatensystem erstellt. Anschließend wird der Rasenmäher-Roboter auf zwei unbekannte, in ca. acht Meter voneinander entfernten, Positionen gestellt, deren Koordinaten aufgenommen werden. Anhand der ermittelten Informationen wird die Roboterausrichtung in Bezug auf Norden ermittelt, wobei die Differenz "Heading-North" für den operationellen Betrieb, ähnlich wie in Kapitel 8.3.3 beschrieben, bestimmt wird. Nachdem das lokale System kalibriert wurde, werden dem Robotersystem die Koordinaten der Eckpunkte der zu mähenden Fläche übermittelt.

Die nächste Stufe wird als "Programmpunkte" bezeichnet. Nachdem die Eckpunkte in einem Referenzfile gespeichert wurden, wird die zu mähende Fläche in fünf mal fünf Zentimeter großen Segmenten unterteilt, deren Mittelpunkte für den Navigationspfad herangezogen werden. Zusätzlich ist es möglich, so genannte "Midway Points" zu generieren, die im Falle einer stark verwinkelten Fläche das Abmähen des gesamten Rasens garantieren sollen.

Nachdem die Installation abgeschlossen wurde, kann der Rasenmäher-Roboter, ausgehend von einem zuvor definierten Startpunkt, auf die Reise geschickt werden, wobei im ersten Schritt die einzelnen Eckpunkte als Wegpunkte dienen. Dadurch werden zunächst die Grenzbereiche abgemäht, weshalb diese Stufe als "Grenz-Strategie" bezeichnet wird.

Darauf folgt die so genannte "Zaun-Strategie". Hierbei muss erwähnt werden, dass die zugrundeliegende Pfadplanungsstrategie extra für den ION Robotic Lawn Mower Wettbewerb konzipiert wurde, weshalb bei anderen Anwendungen die Reihenfolge der einzelnen Stufen anders sein bzw. der Umgang mit auftretenden Objekten wie Zäunen oder Blumenbeete auf eine andere Art und Weise bewältigt werden kann. Mehr dazu in Kapitel 8.4.

Besonders interessant ist die nächste Stufe, die als "Innenfeld-Strategie" bezeichnet wird. Nachdem der Grenzstreifen zur Gänze abgemäht wurde, werden neue way points in 80 Zentimeter langen Abständen generiert, denen der Rasenmäher-Roboter folgen soll.

In der darauffolgenden Stufe wird die so genannte "Blumenbeet-Strategie" angewandt, wobei an dieser Stelle die gleiche Aussage wie bei der "Zaun-Strategie", mit Hinweis auf Kapitel 8.4, getätigt werden kann.

Abschließend wird die "Finishing Field Strategie" ausgeführt, im Zuge derer, im Falle

eines bereits komplett abgemähten Feldes, der Roboter deaktiviert wird (vgl. ebd.). Da die Rückkehr zum Ausgangspunkt kein Kriterium des Wettbewerbes ist, wurde eine entsprechende Funktion nicht implementiert, was jedoch wünschenswert und auch verhältnismäßig einfach zu realisieren wäre, da der Startpunkt als letzter way point interpretiert werden könnte.

Wie bereits erwähnt wurde, ist der "A.W.S.U.M.M.O.W." nur ein Beispiel dafür, dass viel hinter einer Pfadplanungsstrategie stecken kann. Es muss jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass dieser Ansatz speziell für den Wettbewerb konzipiert wurde. Leider sind keine Tests auf einem anderen Gelände bekannt, die die Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieser Strategie überprüfen könnten. Der vorgestellte Ansatz ist somit als einer von vielen Pfadplanungsmöglichkeiten zu betrachten.

"Dynamic Path Planning" wäre eine weitere Option. Sie liegt dem "CWRU Cutter" (vgl. [URLa-05] u. [URLa-11]) zugrunde und besteht aus vier Stufen, wobei zunächst Eckpunkte und Grenzlinien an das Rasenmäher-Robotersystem übermittelt werden. Der Rasenmäher ist dazu in der Lage, einmal detektierte Objekte in der virtuellen Karte, in Form von Grenzlinien innerhalb der zu mähenden Fläche, zu platzieren. Sind alle Hindernisse kartiert, wird das Feld in Zellen aufgeteilt und ein Navigationspfad generiert (vgl. ebd.).

8.3.5 Implementierung unterschiedlicher Modi und Verhalten

Eine alternative Herangehensweise bieten unterschiedliche Modi und Verhalten. Forscher der National Chung Hsing University entwickelten in diesem Zusammenhang einen Rasenmäher-Roboter, der mit drei operationellen Modi ausgestattet ist (vgl. [SHI-08] u. [HSU-10]). Bezogen auf ein rechteckiges Testfeld wurden ein Zeitspar-, Energiespar- und ein Mixmodus entwickelt, deren Pfade in Abb. 58 dargestellt sind.

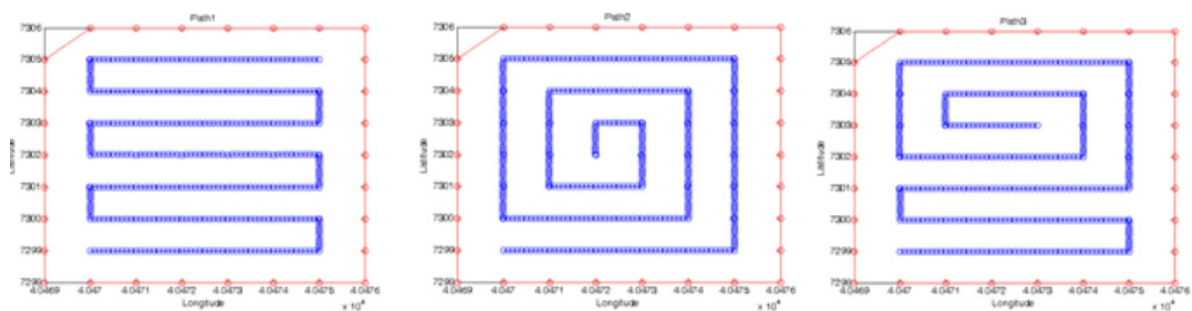


Abb. 58: v.l.n.r. Pfade des Zeitspar-, Energiespar- und Mixmodus

Quelle: [HSU-10], modifiziert

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden ersten Pfaden ist, dass beim Zeitsparmodus, im Vergleich zum Energiesparmodus, mehr lange gerade Pfadabschnitte vorliegen, bei denen der Roboter, im Idealfall mit Maximalgeschwindigkeit fahren kann, was sich allerdings negativ auf den Energieverbrauch auswirkt (vgl. ebd.).

M. WASIF von der University of Gurjat, stattete den von ihm mitentwickelten Prototypen mit Verhaltensmuster aus, die je nach bestimmten Stimuli zur Anwendung kommen. Dieser Ansatz wurde speziell für unbekannte Umgebungen, die in der Regel dynamisch und unstrukturiert sind, entwickelt. Nach dem Start begibt sich der Rasenmäher-Roboter auf die Suche nach Gras. Insofern mittels einer Kamera und Image Matching eine zu mähende Fläche detektiert wurde, startet der Mähprozess. Währenddessen wird weiterhin fortlaufend nach Gras gesucht. Trifft der Roboter auf ein Hindernis, das mit Hilfe von Sonartechnologie erfasst wird (siehe dazu Kapitel 8.4.2), wird ein Ausweichmanöver eingeleitet. Damit keine Grasfläche doppelt gemäht wird, wird die Graslänge mittels Sensoren ermittelt. Entspricht das Gras der gewünschten Länge, bleiben die Mähmesser außer Betrieb. Nachdem der Roboter keine zu mähende Fläche mehr findet, wird dieser zu seiner Ausgangsposition zurückgeschickt (vgl. [WAS-11]).

Die Idee hinter diesem Ansatz ist gut und auch die ersten Simulationen scheinen vielversprechend. Allerdings müssen noch einige Verbesserungen und mehr praktische Tests durchgeführt werden. Diese Aussage kann auch für die drei zu Beginn des Kapitels behandelten Modi getätigt werden, da derzeit diesbezüglich der Forschungsschwerpunkt eher im theoretischen Bereich liegt.

8.3.6 Blockaufteilung und Attributierung der Rasenfläche

Eine weitere Möglichkeit zur Bearbeitung der gesamten Rasenfläche bietet die Unterteilung dieser in gleich große Blöcke, die mit einem Attribut, das als Mäh-Status bezeichnet werden kann, versehen werden. Als Attributwerte stehen "gemäht" und "ungemäht" zur Verfügung. Dieser Ansatz kommt beim "Deep Green" des University of New Haven Robotics Club zur Anwendung (vgl. [URLa-o8]). Der betreffende Rasenmäher-Roboter wurde für den Statischen Wettbewerb der ION Robotic Lawn Mower Competition konzipiert, dessen rechteckiges Feld bekannt ist (vgl. Kapitel 4.5). Die zu mähende Fläche wurde in 150 1x1 Meter große Blöcke unterteilt, wobei zu Beginn des Mähvorgangs jeder Block mit dem Attribut "ungemäht" versehen wurde. Über das integrierte GPS verfügte der Roboter Informationen zu seinen aktuellen Standort und auch darüber, in welchem Block er sich gerade befindet. Aufgrund der Ausmaße des "Deep Green" ist es möglich, einen Block mit einer Überquerung vollständig zu mähen. Nach dem Mähen wird den jeweiligen Blöcken das Attribut "gemäht" zugeteilt, wobei diese als "nicht befahrbar" interpretiert werden. Es handelt sich dabei um Barrieren für den Rasenmäher, der in weiterer Folge "ungemähte" Blöcke ansteuert (vgl. ebd.).

Der "Deep Green" konnte den zweiten Platz beim statischen Wettbewerb im Jahr 2010 erobern und bewies damit die Funktionalität des zugrundeliegenden Pfadplanungssystems. Da bei diesem Wettbewerb jedoch keine Hindernisse vorkommen und dies für

alltägliche Situationen untypisch ist, müssten für Privatgärten entsprechende Systeme integriert werden.

8.3.7 Unterteilung und Gewichtung der zu mähenden Fläche

Einen der Blockaufteilung und Attributierung durchaus ähnlichen und vergleichbaren Ansatz entwickelten J. OUSINGSAWAT und M. G. EARL, der auf gewichteten Regionen basiert (vgl. [OUS-07]). Ausgangspunkt ist ein vordefiniertes Pfadmuster, das dem Pflügen eines Feldes nachempfunden ist (vgl. Abb. 57) und das in diesem Fall als "*Rasenmäher-Muster*" (vgl. ebd.) bezeichnet wird. Kennzeichen dieses Musters ist, dass dieses im Wesentlichen aus lediglich zwei Bewegungen bestehen und zwar entlang eines geraden sowie eines halbkreisartigen Pfades (vgl. ebd.).

Das Verfahren fußt auf dem Prinzip der Unsicherheit, bei dem Regionen Unsicherheitswerte zwischen 0 und 1 aufweisen können. Liegt eine Unsicherheit von 0 vor, ist keine Unsicherheit vorhanden. Das bedeutet, dass die betreffende Region nicht untersucht werden muss. Im umgekehrten Fall muss eine Region mit hoher Unsicherheit untersucht werden. Umgemünzt auf die Rasenmäher-Roboter-Problematik können Bereiche innerhalb einer zu mähenden Fläche gewichtet werden. Höher gewichtete Regionen sind somit eher anzusteuern, als niedrig bzw. nicht gewichtete Regionen.

Zu Beginn des Mäh-Prozesses ist die gesamte Fläche, die im Zuge der Installation quadratisch unterteilt wurde, gewichtet. Der Roboter bewegt sich anschließend entlang der ihm bestimmten Bahnen über das Feld, wobei die befahrenen Bereiche an Gewichtung verlieren (siehe Abb. 59). Wie hoch der jeweilige Verlust an Gewicht ist, wird durch die Ausrichtung des Rasenmähers bestimmt. Vollführt der Roboter, z.B. innerhalb eines Feldes eine Drehung, da dieser soeben an die System- bzw. Feldgrenze gestoßen ist, kann unter Umständen ein bestimmter Teil dieser Region, aufgrund der Rotationsbewegung, ungemäht bleiben (vgl. ebd.).

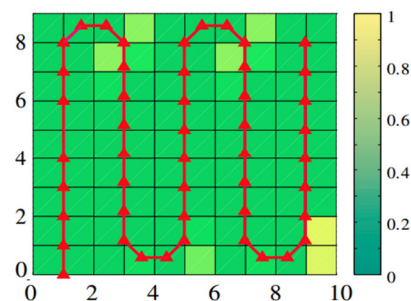


Abb. 59: Gewichtung von Regionen

Quelle: [OUS-07]

Der Ansatz unterliegt dabei der Beschränkung, dass alle Bereiche innerhalb der Spalten eine idente Gewichtung aufweisen. Eine Gewichtung basierend auf einzelnen Zellen

wäre diesbezüglich wünschenswert. Hinzu kommt, dass diese Methode eine mehrmalige Befahrung einzelner Regionen durch den Roboter verlangt, worunter die Effizienz leidet. Als Systemergänzung zur vollständigen Abdeckung der Rand- und Eckbereiche könnte dieses Verfahren jedoch sehr hilfreich sein.

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass intelligente Rasenmäher-Roboter auf vielfältige Art und Weise innerhalb ihres Arbeitsbereiches navigieren und dabei ihre eigentliche Aufgabe, das Mähen des Rasens, zumindest theoretisch erfüllen können. Es gibt viele Ansätze, Strategien, Modi, Stufen, usw., die allesamt unter den oftmals synonym verwendeten Sammelbegriff "Pfadplanung" fallen. Es muss an dieser Stelle ausdrücklich festgehalten werden, dass es kein perfektes System gibt bzw. geben kann, da alle Schwächen und Stärken in bestimmten Bereichen aufweisen. Viele der vorgestellten Beispiele sind fehleranfällig und wohl (noch) nicht marktreif. Dennoch handelt es sich dabei oft um vielversprechende Verfahren, deren Entwicklung mit besonderem Interesse zu verfolgen ist. Für die Zukunft wäre deshalb ein intensiverer Informationsaustausch zwischen einzelnen Forschungsteams wünschenswert.

Nachdem verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt wurden, wie sich ein Rasenmäher-Roboter innerhalb eines Arbeitsfeldes fortbewegen kann, werden im nächsten Kapitel Methoden zur Erkennung von statischen und dynamischen Hindernissen sowie zur Verfügung stehender Ausweichstrategien untersucht.

8.4 Methoden zur Erkennung von statischen/dynamischen Hindernissen und Ausweichstrategien

Die vor- bzw. rechtzeitige Detektion von statischen und dynamischen Hindernissen, kann aus Gründen der Gewährleistung der Sicherheit als eine der Kernaufgaben intelligenter Rasenmäher-Roboter angesehen werden. Im Sinne der Navigation handelt es sich dabei um eine Objektlokalisierung bzw. -positionierung, die weitaus fehleranfälliger als die Selbstlokalisierung ist, da diese die Basis für die Ortsbestimmung von Objekten ist. Für den operationellen Einsatz von Rasenmäher-Robotern reicht es jedoch nicht aus, statische und dynamische Objekte lediglich zu erkennen. Die darauffolgende Strategie ist von gleich hoher Bedeutung für eine sichere und kollisionsfreie Navigation innerhalb der zu mähen- den Fläche.

Im Falle einer Hinderniserkennung, wird, insofern es sich um ein statisches Objekt handelt, eine Ausweichstrategie eingeleitet. Dabei können drei Varianten unterschieden werden, die in Abb. 60 auf der nächsten Seite graphisch dargestellt sind. Die am häufigsten verwendete Strategie kann als "Umfahrung" bezeichnet werden (siehe Abb. 60, links). Dabei verlässt der Roboter, nach Unterschreitung eines festgelegten Abstandswertes, den vordefinierten Pfad, umfährt dabei in engem Abstand das Hindernis, je nach Ausgangspo-

sition, links oder rechts und steuert anschließend wieder auf den ursprünglichen Pfad zurück.

Die zweite Möglichkeit kann als "Umrundung" bezeichnet werden (siehe Abb. 60, mitte), wobei der ursprüngliche Pfad erst nach einer vollständigen Umrundung des Objektes wieder eingenommen wird. Diese Variante wird jedoch äußerst selten angewandt, verzeichnet im Vergleich zur Umfahrung jedoch bessere Abdeckungsergebnisse.

Die dritte Strategie, die als "Umkehrung" (siehe Abb. 60, rechts) bekannt ist, verfolgt z.B. der "InstiGator" der University of Florida (vgl. [URLa-06] u. [URLa-20]), der bei auftretenden Hindernissen das jeweilige Objekt nicht umfährt, sondern um 180° wendet und auf dem nächsten Pfad in entgegengesetzte Richtung weiter mäht. Dabei bleibt zunächst der Bereich hinter dem Hindernis völlig unberücksichtigt.

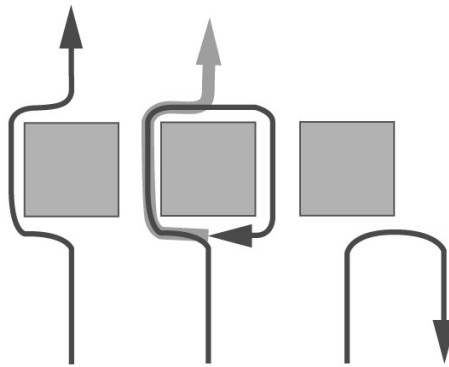


Abb. 60: Graphische Darstellung von Ausweichstrategien

Bei dynamischen Objekten wird hingegen der Rasenmäher sofort zum völligen Stillstand gebracht. Nach einer festgelegten Zeit führt der Roboter erneut Scans durch, wobei überprüft wird, ob der Weg wieder frei ist oder nicht.

In den folgenden vier Subkapiteln werden diesbezüglich unterschiedliche Objekterkennungssysteme im Kontext von autonomen Rasenmäher-Robotern untersucht.

8.4.1 Einsatz von Laserscantechnologie zur Objektdetektion

Die Liste von Rasenmäher-Robotern, die mittels Lasertechnik Objekte detektieren, ist lang. Beispiele dafür sind in [DAL-10], [NOU-06], [SCHa-09], [SCHb-10], [URLa-02], [URLa-05], [URLa-11], [URLa-09], [URLa-14] und [URLa-15] beschrieben.

Mit Hilfe von Laserscannern ist es möglich, die Position eines Hindernisses in Front des Rasenmähers, die Distanz zwischen Roboter und Objekt sowie dessen Größe zu ermitteln (vgl. [URLa-15]), wobei es sich ausschließlich um Entfernungsmessungen handelt. Laserscanning kann als Erweiterung der konventionellen Radartechniken auf den optischen Frequenzbereich angesehen werden, wobei mittels Laufzeitbestimmung von Laserimpulsen die Distanz ermittelt wird. Bei diesem aktiven Verfahren wird ein Laserimpuls

ausgesendet, der von Oberflächen reflektiert und über eine Photodiode wieder aufgenommen wird, wobei das Produkt der Laufzeit und der Lichtgeschwindigkeit gleich der zweifachen Entfernung zum Objekt entspricht (vgl. [PAU-10]).

Die Anschaffungskosten für geeignete Laserscanner liegen in etwa zwischen 2.500 \$ und 7.000 \$, weswegen diese Methode eine der teuersten ist. Ob das PreisLeistungsverhältnis vertretbar ist, soll anhand einer Analyse unterschiedlicher Prototypen herausgefunden werden.

Der Einsatz von LIDAR (Light Detection and Ranging) im Kontext von autonomen Rasenmäher-Robotern, verlangt eine genaue Parametrierung, da ansonsten auch hohes Gras als ein potentiell Hindernis eingestuft werden könnte (vgl. [DAL-12]). Eine Gegenmaßnahme dazu wurde für den "CWRU Cutter" entwickelt, wobei zusätzlich eine Kamera verwendet wird, mit Hilfe derer, detektierte Objekte überprüft werden. Dabei wird auf Basis eines Bildabgleichs herausgefunden, ob es sich beim Objekt um ein natürliches oder ein künstliches Hindernis handelt (vgl. [SCHb-10]). Ähnliche Ansätze verfolgen der "Automow" der Auburn University (vgl. [URLa-12]) sowie der "Wright Bot" der Wright State University (vgl. [URLa-09]), die ebenfalls Kameras zur Unterstützung der Objektdetektion mittels LIDAR verwenden.

Der Aufnahmebereich (FOV, en. field of view) von Laserscannern ist aufgrund der Abhängigkeit vom Öffnungswinkel beschränkt. Zudem können die eindimensionalen Polarkoordinaten lediglich im zweidimensionalen Raum aufgenommen werden. Um den Aufnahmebereich zu vergrößern, verwenden manche Prototypen einen schwenkbaren Laserscanner (vgl. ebd.), siehe Abb. 61.



Abb. 61: Schwenkbarer Laserscanner

Da sich der Rasenmäher-Roboter lediglich vorwärts bewegt, sind 360° Laserscanner eher unüblich. Hingegen werden oftmals extreme Weitwinkelobjektive verwendet. So z.B. bei der "Grass Shredding Unit" der Georgia Southern University (vgl. [URLa-02]), deren Laserscanner ein FOV von 240° aufweist. Der Aufnahmebereich wurde zur besseren Navigation um das Objekt in sechs Quadranten unterteilt (siehe Abb. 62). Tritt kein Objekt auf, so mäht der Roboter weiter entlang seines Pfades. Wird ein bestimmter Abstand-Schwellwert unterschritten, wird das Ausweichmanöver eingeleitet. Befindet sich beispielsweise ein Hindernis im zweiten Quadranten, bewegt sich der Roboter in Richtung des dritten und vierten Quadranten, wobei die Quadranten 0, 1 und 2 weiterhin das Objekt

beobachten, damit mit Hilfe der Auswertung der aufgenommenen Abstandsdaten gewährleistet wird, dass der Rasenmäher nicht frontal oder seitlich das Hindernis rammt bzw. schrammt. Nachdem das Hindernis nicht mehr detektiert wird, da es sich bereits außerhalb des Aufnahmebereiches befindet, navigiert der Roboter zum ursprünglichen Pfad zurück (vgl. ebd.).

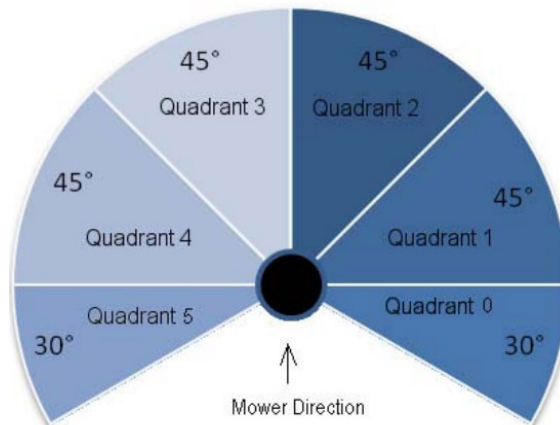


Abb. 62: Aufteilung des FOV in sechs Quadranten

Quelle: [URLa-02]

Die Genauigkeit der Laserscanner ist von den jeweiligen Gerätekonfigurationen und Ausführungen abhängig. Mit einer Frequenz von zehn Hertz erreicht die "Grass Shredding Unit", deren Laserscanner 2.500 \$ kostet, auf vier Meter eine Genauigkeit von zwei Zentimeter (vgl. ebd.). Im Vergleich dazu liefert der SICK Laser Measurement Scanner, der für den "Lawn Transformer" verwendet wurde, eine Genauigkeit von rund einem Zentimeter auf eine maximale Entfernung von 80 Metern (vgl. [URLa-15]). Im Sinne der Wirtschaftlichkeit und unter Berücksichtigung der benötigten Genauigkeitsbereiche, sind die kostengünstigeren Scanner ausreichend. Eine Aufnahmedistanz von 80 Metern scheint übertrieben und unnötig, da aufgrund der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von ca. 5-10 km/h ein totaler Stopp des Rasenmäher-Roboters innerhalb von zwei Metern möglich ist. Zudem ist eine Detektionsgenauigkeit von rund zwei Zentimetern angemessen.

Laserscanner detektieren mit großer Genauigkeit statische und dynamische Objekte, was sich auf den Preis niederschlägt. Im Vergleich konnte indessen gezeigt werden, dass auch jene Geräte der unteren Preisklasse für den Anwendungsbereich von Rasenmähern qualitativ ausreichend sind, diese allerdings auch in etwa 2.500 \$ kosten. Bei Multifusionssystemen sind jedoch in sämtlichen Bereichen die Kosten niedrig zu halten, da sonst das Gerät schlichtweg nicht verkauft werden kann, da dies zu teuer für den Massenmarkt ist. Im nächsten Schritt werden kostengünstigere Ultraschall- und Infrarotsensoren zur Objekterkennung unter die Lupe genommen.

8.4.2 Objekterkennung mit Hilfe von Ultraschall- und Infrarotsensoren

Im Vergleich zu Laserscannern sind die Kosten von Ultraschallsensoren verschwindend gering und im Grunde vernachlässigbar. Die Kostenspanne reicht von rund 30 \$ bis 150 \$. Aufgrund der ebenfalls langen Liste von Prototypen, die diese Technik zur Objektdetektion einsetzen, kann vermutet werden, dass in der Fachwelt Ultraschallsensoren diesbezüglich als ernstzunehmende Alternative zu Laserscannern angesehen werden. Beispiele dazu sind in [HUA-10], [URLa-01], [URLa-04], [URLa-06], [URLa-08], [URLa-13], [URLa-19] und [URLa-20] beschrieben.

Im Bereich der Infrarotsensoren liegt ein vergleichbarer Kostenfaktor vor. Allerdings sind dem Autor nur zwei Prototypen bekannt, die mit Hilfe dieser Technik zur Objektdetektion eingesetzt werden. Dabei handelt es sich einerseits um "Moogie" der Wright State University (vgl. [URLa-17]) und andererseits um "Mini-Mow" der Cedarville University (vgl. [URLa-03]).

Das Prinzip, das der Distanzmessung von Ultraschall- und Infrarotsensoren zugrunde liegt, ist dem des Laserscanning sehr ähnlich. Impulse werden ausgesendet, reflektierte Anteile aufgenommen und mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit werden Distanzwerte zum reflektierenden Objekt berechnet. Im Vergleich zur Lasertechnik sind jedoch die maximal messbaren Distanzen wesentlich geringer, bei größerem Einfluss der atmosphärischen Bedingungen. Im Falle der Infrarotsensoren kommt hinzu, dass diese stärker vom Sonnenlicht beeinflusst werden können (vgl. ebd.).

Bei Verwendung der Ultraschalltechnik müssen hochfrequente Sensoren im kHz-Bereich eingesetzt werden, da nur diese in der Lage sind, das Rauschen, das durch den Rasenmäher-Motor verursacht wird, zu filtern (vgl. [URLa-01]). Obendrein sind die Roboter meist mit zwei Ultraschallsensoren, links und rechts auf der Frontseite, ausgestattet. Der "Autonomous Lawnmower" der University of North Florida (vgl. [URLa-04]) verwendet sogar vier Sensoren, die bei einer Frequenz von 42 kHz Objekte im Bereich von zehn Zentimeter bis zu sechs Meter detektieren können.

Leider wurden in den aufgezählten Beiträgen keine weiteren Genauigkeitsangaben bzw. Aussagen über die Zuverlässigkeit dieser Systeme gemacht, weswegen ein gewisser Unsicherheitsfaktor vorliegt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der messbare Abstand zwischen Roboter und Rasenmäher ausreichend ist, um eine entsprechende Ausweichstrategie rechtzeitig einzuleiten. Aufgrund der geringen Kosten und des vergleichbaren Genauigkeitsbereiches, sind Ultraschallsensoren daher durchaus marktreif und konkurrenzfähig im Bereich der Objekterkennung. Derartige Systeme müssten jedoch mit zusätzlichen Berührungssensoren, die in Kapitel 8.4.4 beschrieben werden, ausgestattet sein, damit gewährleistet werden kann, dass bei zu hohen atmosphärischen Fehlerein-

flüssen, der Roboter zumindest bei Kollisionen den Betrieb einstellt und somit keinen weiteren Schaden mehr anrichten kann.

8.4.3 Objektbestimmung unter Verwendung visueller Systeme

Visuelle Systeme, die auf Kameras basieren, werden in erster Linie als Ergänzung zu Laserscan- oder Ultraschall- bzw. Infrarotsensorsystemen eingesetzt (vgl. Kapitel 8.4.1). Dennoch gibt es auch rein kamerabasierte Ansätze, wie jener von A. BERTANI et al. (vgl. [URLa-16]). Für den Prototyp namens "BIGFOOT" wurde ein Objekterkennungssystem entwickelt, das mit einer herkömmlichen Webcam ausgestattet ist. Zusätzlich wurde eine OpenCV Library, eine freie Programmbibliothek von Bildverarbeitungsalgorithmen, herangezogen, mit Hilfe derer die aufgenommenen Fotos bearbeitet und in nahezu Echtzeit Hindernisse auf dem Weg detektiert werden können. Das dahinterstehende Prinzip sieht vor, dass im Zuge der Installation Aufnahmen vom Rasen gemacht werden. Diese Referenzbilder werden mit den während der Fahrt aufgenommenen Bildern verglichen, wobei Farbwerte, die nicht innerhalb eines bestimmten Toleranzbereiches in der Referenz vorkommen, detektiert werden. Wird ein Hindernis erkannt, schlägt der Roboter einen anderen Kurs ein und fährt auf einem anderen Pfad weiter (vgl. ebd.).

Das Obstacle-Avoidance System des "BIGFOOT" ist jedoch sehr fehleranfällig. Außerdem wurden im zugrundeliegenden Artikel keine Angaben über die Genauigkeit gemacht, weswegen die Zuverlässigkeit des Systems schwer einschätzbar ist. Dabei muss erwähnt werden, dass dieser Prototyp für den statischen Wettbewerb der ION Robotic Lawn Mower Competition konzipiert wurde und dabei den dritten Platz erreicht hat. Allerdings sieht dieser Wettbewerb keine Hindernisse vor, weswegen dieses Objekterkennungssystem bestenfalls als einer der ersten Versuche, eine eigenständige, kamerabasierte Objekterkennung zu entwickeln, verstanden werden kann.

A. CASH et al. (vgl. [URLa-07]) entwickelten diesbezüglich ein interessantes stereoskopisches Kamerasystem zur Detektion von Hindernissen. Die Idee dahinter war, eine kostengünstige Alternative zu RADAR- und LIDAR-Verfahren zu schaffen. Gemäß dem stereoskopischen Prinzip sind zwei Kameras auf gleicher Höhe positioniert, wobei der Abstand, der als Basis bezeichnet wird, konstant ist. Mit Hilfe von zwei Aufnahmen vom gleichen Objekt, die um die Basis versetzt sind, kann ausgehend von den beiden zweidimensionalen Bildern ein Raumeindruck geschaffen werden.

Die beiden Kameras müssen dabei präzise kalibriert und aufeinander abgestimmt werden, damit die inneren und äußeren Parameter bestimmt werden können, die wiederum für die Entzerrung der Bilder notwendig sind. Während der Fahrt werden die aufgenommenen Bilder zunächst entzerrt und anschließend ein Disparitäten-Image erstellt, das die Tiefen des Raumes widerspiegelt, woraus Objekte extrahiert werden können (vgl. ebd.).

Erste Tests und Simulationen im Labor verliefen erfolgreich. Allerdings sind dem Autor keine durchgeführten Praxistests bekannt. Ein Durchbruch von Objekterkennungssystemen, die dazu lediglich Kameras verwenden, ist nicht zu erwarten, obwohl interessante Versuche in diesem Bereich bereits unternommen wurden. Allerdings scheint sich abzuzeichnen, dass Kamerasysteme wohl nicht über die Funktion eines Ergänzungssystems hinauskommen.

8.4.4 Objekterkennung mittels Berührungssensoren

Berührungssensoren (en. Bumpers) aller Art sind nützliche Ergänzungen für bestehende Objekterkennungssysteme. Sie garantieren im Extremfall, beispielsweise im Zuge einer Kollision, die Gewährleistung der Sicherheit, zum einen, da der Aufprall etwas abgefedert werden kann und zum anderen, da es zum sofortigen Stopp des Rasenmähers kommt. Außerdem ist es mit Hilfe dieser Sensoren möglich, enger an statische Objekte vorbeizufahren. Das Entwicklungsteam des "A.W.S.U.M.M.O.W." hält diesbezüglich fest: *"The laser-range -finder is not practical for this purpose because it takes a significant amount of processing time to differentiate between the ground and an obstacle. The solution for this design is a force-sensing bumper"* ([URLa-21], S. 14). Eine mögliche Ausführungsform von Berührungssensoren ist in Abb. 63 dargestellt.



Abb. 63: Mögliche Ausführungsart von Berührungssensoren

Quelle: [URLa-10]

Berührungssensoren müssen hochempfindlich sein. Geeignete Streifenpotentiometer können Distanzveränderungen ab 130 μm erfassen. *"This sensitivity allows the mower to gently touch the obstacles and move ... without a major collision. Additionally it allows the mower to feel the way around the obstacle and detect when it is no longer in contact with it."* ([URLa-10], S. 7) Als eigenständiges Objekterkennungssystem sind Berührungssensoren jedoch unzureichend.

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln unterschiedliche Methoden zur Grenzziehung und Objekterkennung sowie verschiedene Pfadplanungs- und Ausweichstrategien

untersucht wurden, widmet sich das nächste Kapitel der Navigation mit Hilfe eines manuell vordefinierten Pfades.

8.5 Navigation mittels manuell vordefinierten Pfad

Neben den in Kapitel 7.2 behandelten SLAM-Verfahren, die jedoch, wie bereits erwähnt, noch zu ungenau für den Anwendungsbereich von Rasenmäher-Roboter sind, benötigen Navigationssysteme, die manuell vordefinierte Wegpunkte (en. way points) verwenden, keine zuvor festgelegten Grenzen und keine entsprechenden Objekterkennungssysteme (vgl. Abb. 46). Ein derartiges System kann definiert werden als: "... *the process of automatically following a predetermined path defined by a set of geodetic coordinates.*" ([BRU-02], S. 1) Diese Vorteile müssen jedoch vom Endbenutzer durch einen weitaus höheren Selbstaufwand, im Rahmen der Installation, erschlossen werden.

Die Idee hinter diesem Ansatz sieht vor, dass der Besitzer eines Rasenmäher-Roboters über ein Graphical User Interface (GUI) einen vordefinierten Pfad zeichnet, den der Roboter im Anschluss folgen soll. M. H. BRUCH et al. (vgl. ebd.) entwickelten in diesem Zusammenhang eine Software, die es dem Benutzer ermöglicht, auf dem Bildschirm über einem hochauflösenden Orthophoto per Maus einen Navigationspfad zu zeichnen (siehe Abb. 64).

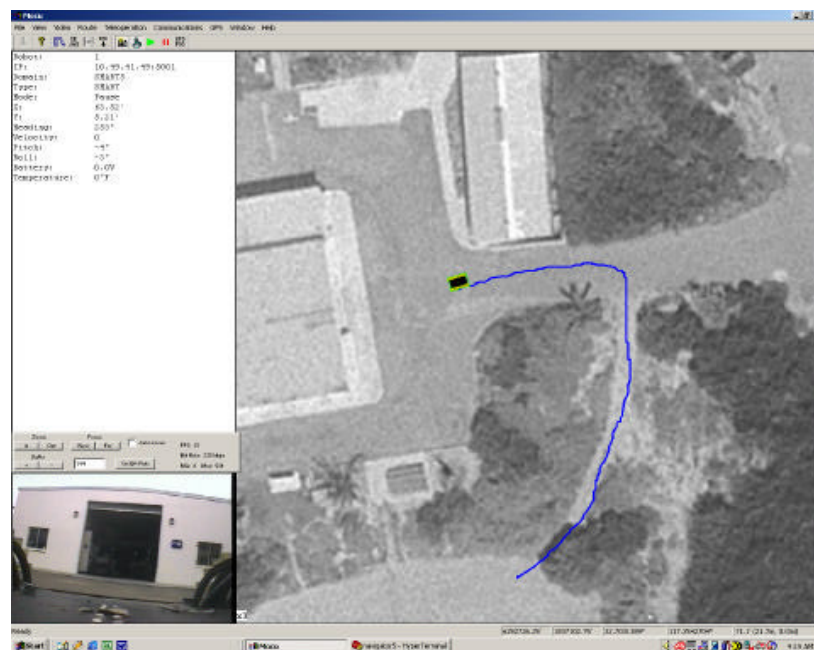


Abb. 64: Eingabemöglichkeit von way points über ein Graphical User Interface

Quelle: [BRU-02]

Die Lagegenauigkeit der Pfadverfolgung entspricht dabei der geometrischen Auflösung des Orthophotos. Meist handelt es sich dabei um Submetergenauigkeit, wobei die Autoren festhalten, dass bei ausreichenden way points sogar RTK-GNSS-Genauigkeit erreicht werden kann (vgl. ebd.).

Der Low-Budget-Prototyp von M. H. BRUCH et al. ist zusätzlich mit einer herkömmlichen GPS-Einheit und einem Odometer ausgestattet, um Position, inkl. Ausrichtung sowie Geschwindigkeit zu messen. Dabei wird ein Kalman-Filter zur Glättung eingesetzt, da bei der Verwendung eines nicht differentiellen GPS weitestgehende Rauschfreiheit idealerweise vorliegen sollte. Der Unterschied zwischen einem gefilterten und ungefilterten bzw. geschätzten und gemessenen Pfad ist in Abb. 65 veranschaulicht.

[Anm.: Aufgrund der geringen absoluten Auflösung der Originalgraphik wurde diese modifiziert und dabei ein Ausschnitt hervorgehoben. Der rote Pfad entspricht den absoluten Messungen des GPS. Die grüne Linie spiegelt hingegen die Glättung mittels Kalman-Filter wider.]

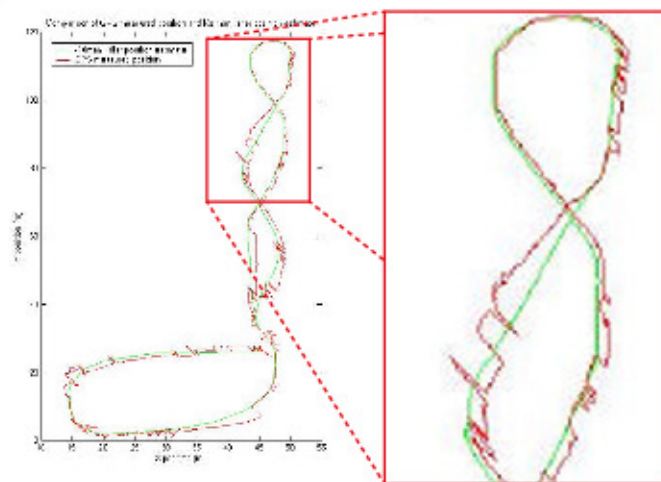


Abb. 65: Geglätteter und ungeglätteter GPS-Track

Quelle: [BRU-02], modifiziert

Da die aktuelle Position erfasst wird, kann die Ausrichtung zum nächsten way point berechnet und dadurch die Geschwindigkeit über einen Microcontroller gesteuert werden, um den nächsten Zielpunkt zu erreichen. Abb. 66 stellt eine Simulation der Pfadverfolgung dar. Dabei ist zu erkennen, dass das System vor allem bei Richtungsänderungen fehleranfällig ist.

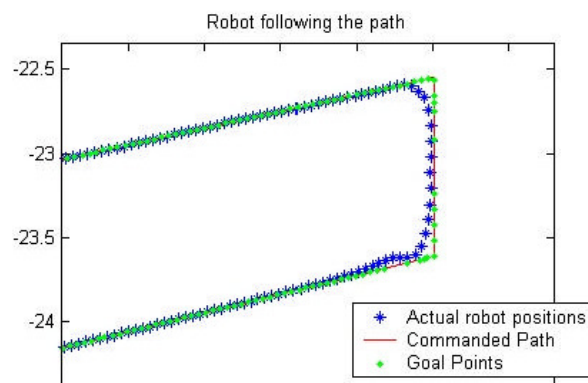


Abb. 66: Simulation einer Pfadverfolgung

Quelle: [BRU-02], modifiziert

Der Prototyp von M. H. BRUCH ist zwar kein Rasenmäher-Roboter, entspricht jedoch dessen durchschnittlichen Größe. Wichtig dabei ist das zugrundeliegende Navigationssystem, das auch auf andere Roboter übertragen werden kann. Sicherlich handelt es sich dabei noch nicht um ein vollausgereiftes System. Vielmehr kann es als Pionier auf diesem Gebiet angesehen werden, wobei dieses bei entsprechenden Weiterentwicklungen und Verbesserungen als kostengünstige Alternative möglicherweise Marktreife im Bereich von Service-Roboter aller Art erlangen kann.

Zur besseren Abdeckung der Eckbereiche könnte ein achtstufiger Pfadalgorithmus herangezogen werden, dessen Abfolge in Abb. 67 graphisch dargestellt ist.

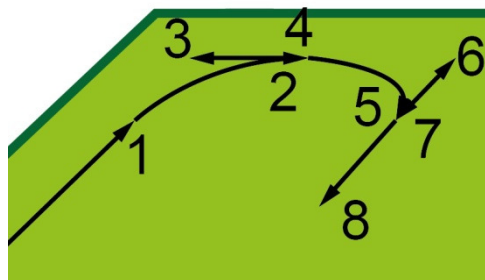


Abb. 67: Strategie zur besseren Abdeckung der Eckbereiche

Die dahinterstehende Strategie entspricht einer Erweiterung des herkömmlichen Farming-Algorithmus. Nachdem der Roboter den Umkehrprozess eingeleitet hat (1), hält dieser auf halber Strecke (2). Anschließend fährt der Rasenmäher solange rückwärts bis der Schnittpunkt des aktuellen Pfades (3) die virtuelle Verlängerung des ersten Pfades schneidet, wodurch der zuvor ungemähte Eckbereich ebenfalls gemäht wird. Dieselbe Vorgangsweise trifft ebenfalls auf den zweiten Part der Umdrehung (Punkt 5, 6 und 7) zu, ehe der Rasenmäher den nächsten parallel liegenden Pfad (8) einnimmt.

8.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchung unterschiedlicher Navigationssysteme und -strategien wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit in verschiedene Bereiche unterteilt, deren Ergebnisse im Folgenden kurz zusammenfassend präsentiert werden. Bei den Bereichen handelt es sich um "Methoden der Grenzziehung", "Methoden der Koppelnavigation", "Pfadplanungsstrategien", "Ausweichstrategien", "Methoden zur Objektdetektion" sowie "weitere Navigationsmöglichkeiten". Zur graphischen Unterstützung dient dazu Abb. 68 auf der nächsten Seite. Die Tabelle listet sämtliche Methoden bzw. Ansätze und Strategien auf, die während der Untersuchung berücksichtigt wurden. Zusätzlich zeigt die Darstellung, sofern dies der jeweilige Bereich ermöglicht, eine Bewertung der Genauigkeit, Fehleranfälligkeit und Effizienz sowie des Kostenfaktors.

Methode/Strategie	Genauigkeit	Fehleranfälligkeit	Effizienz	Kostenfaktor
Grenzziehung				
Koordinaten (vorgegeben)	●●●	●●●	-	●●●
Koordinaten (Erhebung)	●●●	●●●	-	●●
Optische Linien	●●	●	-	●●●
Koppelnavigation				
IMU	●●●	●●	-	●●
Odometer, Kompass	●●●	●	-	●●●
Hybrides System	●●●	●●	-	●●
Pfadplanungsstrategien				
Zufallsmuster	●●●	-	●	●●●
Global Mapping Method	●●●	-	●●●	●
SUMo-Strategie	●●●	-	●●	●●●
Farming Algorithmus	●●●	-	●●●	●●
Boustrophedon-Path	●●●	-	●●	●●
Blockattribution	●●●	-	●●	●●
Gewichtung von Regionen	●●	-	●	●●
Ausweichstrategie				
Umfahrung	●●	-	●●	-
Umrundung	●●●	-	●	-
Umkehrung	●●	-	●	-
Objektdetektion				
LIDAR	●●●	●●	-	●
Ultraschall	●●●	●●	-	●●●
Infrarot	●●●	●●	-	●●●
Visuelle Systeme	●	●	-	●●●
Bumper	●●●	●●●	-	●●●
Weitere Navigationsmöglichkeiten				
Vordefinierter Pfad	●●	●●	-	-

Abb. 68: Ergebnis der Untersuchung unterschiedlicher Navigationssysteme und -strategien

Im Bereich "Grenzziehung" wurden zwei grundlegende Verfahren untersucht, wobei jene mittels koordinativ bekannter Punkte als echte Alternative zur Begrenzung mit Hilfe von Induktionsschleifen anzusehen ist. Dabei können zwei Varianten unterschieden werden. Zum einen müssen die entsprechenden Daten auf beliebige Art und Weise beschafft oder selbst erfasst werden, was mit einem bestimmten Aufwand verbunden ist. Zum anderen ist es möglich, die Daten mit Hilfe des Roboters zu erfassen, der im Zuge der Installation über den Grenzbereich bewegt werden kann und dabei beispielsweise mit Hilfe einer dGNSS-Einheit die erforderlichen Daten aufnimmt. Beiden Varianten liegt eine hohe Genauigkeit zugrunde. Zudem sind diese Methoden äußerst robust, wobei die Kosten annehmbar sind. Etwas kostengünstiger ist hingegen das auf optischen Linien basierende Verfahren, das jedoch aufgrund der starken Abhängigkeit von sich verändernden Lichtverhältnissen weniger genau und deutlich fehleranfälliger ist. Durch die Entwicklung besserer Bildbearbeitungsalgorithmen könnten derartige Systeme jedoch zunehmend kon-

konkurrenzfähig werden. Zurzeit ist dies, hinsichtlich des Kosten-Nutzen Verhältnisses unrealistisch.

Die Untersuchung unterschiedlicher Methoden zur Koppelnavigation hat ergeben, dass jene Systeme, die mit einer inertialen Messeinheit ausgestattet sind, eine hohe Genauigkeit von bis zu zwei Zentimetern auf einer Distanz von zwölf Metern aufweisen, was sich deutlich im Preis widerspiegelt. Bei Verwendung preiswerterer MEMS-Technologie (vgl. Kapitel 7.1.3) müssen entsprechende Genauigkeitseinbußen hingenommen werden. Eine gute Alternative bieten Odometer und Kompass, die eine vergleichbare Genauigkeit erreichen, jedoch deutlich fehleranfälliger sind. Hybride Systeme, bei denen Odometer und Kompass als Backup-System bzw. Ergänzungssystem verwendet werden, sind durchaus empfehlenswert, vor allem dann, wenn MEMS-Technologie zum Einsatz kommt, da mit Hilfe der Korrekturdaten ein robustes System mit annehmbarer Genauigkeit umgesetzt werden kann.

Hinsichtlich Pfadplanungsstrategien war es nicht einfach, unterschiedliche Ansätze miteinander zu vergleichen, da viele völlig unterschiedlich aufgebaut sind. Hinzu kommt, dass einige Ansätze nur auf theoretischer Basis getestet wurden. Die Pfadplanung kann diesbezüglich noch als Sorgenkind intelligenter Rasenmäher-Roboter angesehen werden, wobei jedoch bislang vielversprechende Ansätze entwickelt wurden. Wie in Abb. 68 zu erkennen ist, ist die Bearbeitung des Feldes mit Hilfe eines zufälligen Musters zwar genau und preiswert, jedoch auch höchst ineffizient und entspricht nicht den Kriterien eines intelligenten Robotersystems. Ebenfalls genau ist die Global Mapping Method, die äußerst effizient, jedoch auch um ein Vielfaches teurer ist. Ein derartig teures Produkt wäre auf dem Markt kaum konkurrenzfähig. Dazwischen sind viele unterschiedliche Strategien anzusiedeln, die ebenfalls genau und in einem annehmbaren Kostenbereich liegen, aber weniger effizient als die Global Mapping Method sind. Nichtsdestotrotz sind alle genannten Strategien, vor allem unter Berücksichtigung des PreisLeistungsverhältnisses, eine echte Alternative zu den beiden vorhin genannten Extremen. Dabei wäre eine Kombination unterschiedlicher Strategien und Ansätze wünschenswert, um dabei die vorliegenden Schwachstellen gegenseitig aufzuheben. Vor allem die Blockattributierung und die Gewichtung von Regionen könnten als Ergänzungssysteme bzw. -strategien eingesetzt werden.

Im Rahmen der Ausweichstrategien, die nach der Detektion von Hindernissen initiiert werden müssen, wurden drei Methoden untersucht, wobei die Umfahrung die effizienteste Methode ist, da die vorgegebenen Pfade weitestgehend eingehalten werden. Genauer ist hingegen die Umrundung, die jedoch nicht immer eingesetzt werden kann. Die Umkehrung ist eine klassische Strategie, wenn der Roboter an seine Grenzen stößt. Bezogen auf Hindernisse ist dieser Ansatz jedoch ineffizient, da der Bereich hinter dem Hindernis zu-

nächst unberücksichtigt bleibt und der Roboter einleitend die Position speichern und später an diese Stelle zurückkehren muss, um den Auftrag fertig auszuführen. Ideal wäre, wenn alle drei Verfahren verwendet werden könnten und abhängig von der jeweiligen Situation die am besten geeignete Variante initiiert werden würde. Bis es jedoch so weit ist, sind weitere Entwicklungen im Bereich von unterschiedlichen Modi und Verhalten von Rasenmäher-Robotern sowie intelligentere Objekterkennungssysteme notwendig.

Die genaueste Methode zur Objektdetektion ist jene mittels LIDAR, die jedoch auch in der kostengünstigsten Variante, mit etwa. 2.500 \$, sehr teuer ist, was vor allem bei Multi-sensor-Robotersystemen die Gesamtkosten exorbitant steigen lassen kann. Als echte Alternativen dazu können Ultraschall- und Infrarotsensoren angesehen werden, die weitaus preiswerter, jedoch auch fehleranfälliger sind. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, visuelle Systeme oder Berührungssensoren, die eigenständig kaum in der Lage sind entsprechende Qualität zu gewährleisten, als Ergänzungssysteme zu implementieren. Eine derartige Variante wäre für den Massenmarkt von Rasenmäher-Roboter ein guter Kompromiss.

Im Bereich "weitere Navigationsmöglichkeiten" wurde eine Methode untersucht, die auf manuell vorgegebenen Pfaden basiert. Als Grundlage dazu dienen Orthophotos, von deren Auflösung sich die Genauigkeit, die bestenfalls im Submeterbereich liegt, ableitet. RTK-GNSS-Genauigkeit im Subzentimeterbereich soll jedoch bei entsprechend vielen Wegpunkten realisierbar sein. Der dahinterstehende Aufwand wäre jedoch denkbar enorm groß. Das vorgestellte System ist zwar vielversprechend, kann aber zurzeit als nicht ausgereift bzw. marktreif bezeichnet werden. Es handelt sich dabei vielmehr um einen äußerst interessanten Versuch, ein alternatives Navigationssystem zu entwickeln, das in der Theorie zwar hervorragend funktioniert, jedoch praktisch noch kaum getestet wurde.

In diesem Kapitel wurden unterschiedliche Navigationssysteme und -strategien im Kontext mobiler, autonomer (Rasenmäher-) Roboter sowie die dahinter stehenden Technologien, Verfahren und Methoden untersucht. Die Resultate dieses und des vorangegangenen Kapitels 7 liefern die Antwort auf die zweiten Forschungsfrage. Im nächsten Kapitel werden die bisher erzielten Ergebnisse vergleichend gegenübergestellt, wodurch die dritte Forschungsfrage beantwortet werden soll.

9 GEGENÜBERSTELLUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE

Das Ziel dieses Kapitels ist es, herauszufinden, ob die gegenwärtige Technologie dazu in der Lage ist, die Anforderungen, die an ein intelligentes Rasenmäher-Robotersystem gestellt werden, zu erfüllen. Um damit gleichzeitig die dritte Forschungsfrage beantworten zu können, ist es notwendig, die bisherigen Forschungsergebnisse vergleichend gegenüberzustellen.

Das vorweggenommene Endergebnis ist graphisch in Abb. 69 dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind die an intelligenter Rasenmäher-Roboter gestellten Anforderungen in sämtlichen Bereich mit der gegenwärtigen Technologie realisierbar. In weiterer Folge werden die Vergleichsresultate separat im Detail und unter Berücksichtigung der vier Grundkriterien, Sicherheit, Qualität, Selbstständigkeit und Kosten präsentiert.

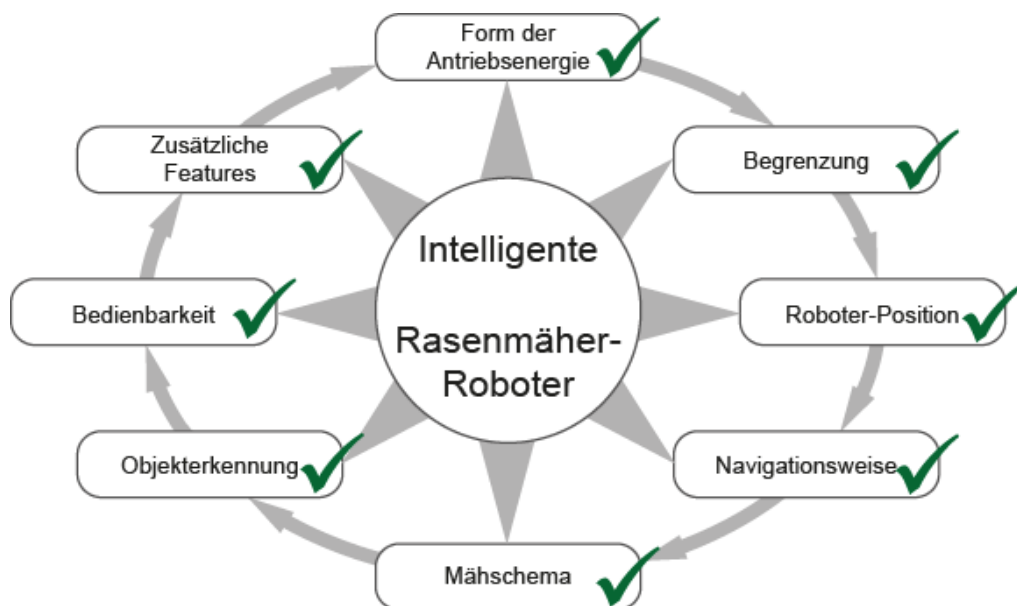


Abb. 69: Bewertung der Realisierbarkeit einzelner Bereiche von intelligenten Rasenmäher-Robotern mit Hilfe gegenwärtiger Technologien

Da die Kosten einer der entscheidendsten Faktoren sind und sich unmittelbar auf die anderen Grundkriterien und Bereiche eines intelligenten Rasenmäher-Roboters auswirken, ist es schwer eine Kostenobergrenze für die folgende Gegenüberstellung der Forschungsergebnisse festzulegen. Wenig Geld für maximale Qualität und Effizienz ist in vielen Bereichen schwer miteinander vereinbar. Da zumindest eine befragte Person Bereitschaft signalisierte, bis maximal 10.000 € für ein intelligentes Rasenmäher-Robotersystem zu investieren, wurde dies als absolute Obergrenze herangezogen und die

einzelnen Methoden und Verfahren, im Hinblick auf den Gesamtpreis des Roboters, auf ihre Eignung hin bewertet. Dabei muss angemerkt werden, dass die Anforderungen der einzelnen Bereiche mit unterschiedlichen Ansätzen realisierbar sind und sich daher eine Preisspanne von ca. 3.000 € bis 10.000 € ergibt.

- Form der Antriebsenergie

Eine Untersuchung der Antriebsenergieform war im Rahmen dieser Masterarbeit nicht zwingend notwendig, da bereits herkömmliche Rasenmäher-Roboter solar-, batterie- oder gas- bzw. benzinbetrieben sein können. Die vorliegenden Kostenunterschiede sind vernachlässigbar und wirken sich nicht auf die Performance des Robotersystems aus. Einzig und allein im Bereich der Sicherheit könnte für eine Bevorzugung umweltschonender solar- oder batteriebetriebener Rasenmäher-Roboter plädiert werden, da damit der Umgang mit leicht entzündlichen und explosiven Materialien vermieden werden würde. In diesem Bereich, dem die Probanden eine eher geringe Bedeutung einräumten, hat der Käufer somit die Qual der Wahl.

- Begrenzung

Die Expertenbefragung lieferte das Ergebnis, dass mehr als die Hälfte der Probanden die alternative Begrenzungsmethode mittels koordinativ bekannter Punkte bevorzugen würde. Die Untersuchung dieser Variante kam zu einem positiven Ergebnis, da eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit, bei annehmbaren Kosten, gewährleistet werden kann, vor allem dann, wenn ein dGNSS oder RTK-GNSS zur Positionsbestimmung des Roboters eingesetzt wird, wodurch zwei Fliegen mit einer Klappe geschlagen werden könnten.

Hingegen erfüllt die Methode mittels optischer Linien, die knapp ein Fünftel der Befragten bevorzugen würde, aus derzeitiger Sicht nicht die qualitativen Anforderungen, obwohl die Entwicklung in diesem Bereich bereits weit fortgeschritten ist.

- Roboter-Position

Die Lagegenauigkeit des Rasenmähers ist ein Bereich mit hoher Bedeutung. Die Befragung lieferte das Ergebnis, dass vor allem dGNSS und RTK-GNSS für den Einsatz, bei dem zumindest Subdezimeter-Genauigkeit gefordert ist, geeignet wären. Die darauffolgende Untersuchung dieser Systeme kam zum Resultat, dass eine Echtzeitpositionierung im Subzentimeterbereich realisierbar ist. Allerdings hat die hohe Genauigkeit ihren Preis. Die Preisspanne liegt, je nach System, zwischen 3.500 \$ und 20.000 \$.

Entgegen den Erwartungen der Experten konnte festgestellt werden, dass, bezogen auf die Genauigkeit, auch der Einsatz von Echtzeit-Tachymetersystemen in Frage kommen würde, derartige Systeme jedoch die festgesetzte Preisobergrenze deutlich überschreiten würden und daher nicht für intelligente Rasenmäher-Roboter geeignet sind.

Eine zusätzliche Untersuchung alternativer Positionierungstechniken kam zum Ergebnis, dass auch Ultraschallmethoden die geforderte Genauigkeit liefern können, jedoch weniger robust und somit unzuverlässiger sind. Da es sich dabei jedoch um eine kostengünstige Alternative handelt, kommt dieses System vor allem als Backup- oder Ergänzungssystem in Frage.

Die Eignung von SLAM-Methoden im Bereich von Rasenmäher-Robotern konnte, aufgrund mangelnder Experimente, nicht bestätigt werden. Ebenso sind GSM und WPS ungeeignet. Informationsextraktion aus großmaßstäbigen Karten sind nicht nur zu ungenau, sondern auch nicht für Echtzeitanwendungen geeignet.

- Navigationsweise und Mähschema

Im Bereich der Navigation hielten rund 70 % der Befragten einen Einsatz einer inertialen Messeinheit für sinnvoll. Die Untersuchung ergab, dass sich die damit verbundenen Relativmessungen hervorragend als Ergänzung der Absolutmessungen eignen. Allerdings könnte dabei rasch die Preisobergrenze überschritten werden. Die weitaus kostengünstigere Variante mittels MEMS-Technologie verursacht hingegen Qualitätseinbußen, die mit Hilfe von Ergänzungssystemen entsprechend niedrig gehalten werden müssten. Eine gute und preiswerte Alternative ist die klassische Koppelnavigation mittels Odometer und Kompass, wobei eine hybride Systemausführung inkl. auf MEMS-Technologie basierender inertialer Messeinheit, unter Berücksichtigung des Preisleistungsverhältnisses, gut geeignet wäre.

Die von den Probanden als eher ineffizient eingeschätzte Koppelnavigation, kann entgegen der Erwartungen, im Bereich der Pfadplanung, die von rund 70% der Befragten bevorzugt werden würde, gut eingesetzt werden. Die Untersuchung unterschiedlicher Pfadplanungsstrategien kam jedoch zum Ergebnis, dass dieser Bereich die größte Baustelle intelligenter Rasenmäher-Roboter ist, aber dennoch bereits einige Strategien die gestellten Anforderungen erfüllen. Dennoch sind Verbesserungen in diesem Bereich möglich und notwendig, die unter Umständen durch eine Kombination unterschiedlicher Ansätze erzielt werden könnten.

- Objekterkennung

Knapp 90 % der Befragten gaben an, eine dynamische Objekterkennung mittels Sensoren zu bevorzugen. Aus Sicht der heutigen Technologie ist dies unter Berücksichtigung der vier Grundkriterien durchaus möglich. Am besten geeignet wäre ein laserbasiertes System, wobei die Gesamtkosten wesentlich in die Höhe steigen würden. Unter Umständen könnte dadurch die Preisobergrenze, in Abhängigkeit der Technologiewahl in anderen Bereichen, überschritten werden.

Kostengünstigere Alternativen basieren auf Ultraschall- oder Infrarot-Sensoren, wobei erstere von den Probanden als effizienter eingeschätzt werden. Aufgrund der größeren Fehleranfälligkeit, erfordern derartige Systeme, zur Einhaltung der gewünschten Genauigkeit, Ergänzungssysteme, wobei Berührungssensoren gut geeignet sind. Zusätzlich können visuelle Systeme verwendet werden. Eine entsprechende gut abgestimmte Multifusionseinheit zur Objekterkennung kann als preiswerte Alternative zu laserbasierten Systemen angesehen werden.

- Bedienbarkeit

Hinsichtlich Bedienbarkeit entspricht weniger oft mehr. Im Idealfall soll der Besitzer eines intelligenten Rasenmäher-Roboters nach der Installation das Gerät nur noch ein- und ausschalten müssen. Im diesen Fall wäre die Verwendung eines Graphical User Interface (GUI) nicht nötig. In Abhängigkeit vom System kann die Verwendung eines GUI jedoch unvermeidbar sein, z.B. im Falle einer manuellen Eingabemöglichkeit von Koordinaten oder zur Systemüberwachung. Für High-End-Produkte, bei denen z.B. Grashöhe, Mähmuster oder sonstige Einstellungen vorgenommen werden können, ist der Einsatz eines GUI ohne Probleme möglich.

- Zusätzliche Features

Zusätzliche Features wurden im Rahmen der Untersuchung intelligenter Rasenmäher-Roboter nicht berücksichtigt. Jedoch sollten entsprechende Systeme zumindest mit Kipp- und Regensensoren ausgestattet sein, die auch häufig bei herkömmlichen Rasenmäher-Robotern, je nach Preisklasse, implementiert sind oder nicht. Wichtig dabei ist, dass die Realisierung etwaiger ergänzender Sensoren problemlos möglich ist. Der Einsatz eines Störmeldesystems, bei dem z.B. eine SMS im Zuge eines Störfalls gesendet wird, ist ebenfalls aus heutiger Sicht realisierbar und stellt ein nützliches Zusatzfeature dar. Zusätzlich könnte mit Hilfe dieser Technik der Roboter ein- und ausgeschaltet werden.

In diesem Kapitel konnte anhand eines Vergleichs der bisherigen Forschungsergebnisse gezeigt werden, dass gegenwärtige Technologien, Methoden und Ansätze durchaus in der Lage sind, die Anforderungen, die an ein intelligentes Rasenmäher-Robotersystem gestellt werden, zu erfüllen. Die Genauigkeit kann in allen Bereichen unter Einhaltung der Sicherheit bei weitestgehender Selbstständigkeit gewährleistet werden. Die Zuverlässigkeit ist hingegen von der Preisklasse abhängig. Die Preisgrenze ist nach oben hin offen, wobei Robotersysteme die Anforderungen überwiegend im mittleren und teilweise auch im unteren Preissegment erfüllen können.

Im nächsten Kapitel wird versucht, ein, hinsichtlich des PreisLeistungsverhältnisses, ideales intelligentes Rasenmäher-Robotersystem zusammenzustellen, wobei je Bereich eine Methodik- und Komponentenauswahl vorgenommen wird.

10 ZUSAMMENSTELLUNG EINES IDEALEN INTELLIGENTEN RASENMÄHER-ROBOTERS ZUR AUTOMATISIERTEN KLEINRAUMNAVIGATION

Auf Basis der gewonnenen Forschungsergebnisse soll im letzten Schritt dieser Masterarbeit versucht werden, ein "ideales" intelligentes Rasenmäher-Robotersystem zusammenzustellen. Dazu ist es notwendig, in den jeweiligen Bereichen eine Wahl zwischen den in Frage kommenden Methoden zu treffen und anhand derer, unter Berücksichtigung des Preis Leistungsverhältnisses, entsprechende Komponenten auszuwählen. Das Ergebnis der Auswahl ist in Abb. 70 tabellarisch dargestellt, wobei nur Komponenten, die für das zugrundeliegende Navigationssystem ausschlaggebend sind, berücksichtigt wurden.

10.1 Komponenten eines intelligenten Rasenmäher-Roboters

Bereich	Beschreibung	Komponente	Kosten
Antrieb	Batteriebetrieben	-	-
Begrenzung	Mittels koordinativ bekannter Punkte - Erhebung durch ein RTK-GNSS	Siehe "Roboter-Position"	-
Roboter-Position	RTK-GNSS	Topcon RTK dGPS	6.000\$
Navigationsweise	Pfadplanung mittels Hybridsystem (MEMS-IMU, Odometer & Kompass)	MicroStrain 3DM-GX1 IMU	150\$
		Turck Wheel Encoder	276\$
		Daventech Digital Compass	57\$
Objekterkennung	Ultraschall- und Berührungssensoren	MaxBotix XL1320AE US-Sensor	150\$
		Celestro SP1-4 String Potentiometer	100\$
Bedienbarkeit	Rudimentäres GUI	-	-
Zusätzliche Features	Regen- und Kippsensoren SMS-Störmeldesystem	-	-

Gesamte Kosten für Navigationssensoren

6.733\$

Abb. 70: Bestandteile eines fiktiv-idealen intelligenten Rasenmäher-Roboters

Die Multifusions-Navigationseinheit des dargestellten fiktiven, idealen intelligenten Rasenmäher-Roboters würde in Summe 6.733 US-Dollar kosten. Nach aktuellem Wechselkurs entspricht dies rund 5.050 Euro. Die einzelnen Komponenten wurden bereits bei Prototypen von Rasenmäher-Roboter eingesetzt und wurden aufgrund ihres Preis Leistungsverhältnisses für diese Zusammenstellung ausgewählt.

Die teuerste Komponente ist die Topcon RTK dGPS-Einheit mit 6.000 \$, die einerseits, im Zuge der Installation zur Ermittlung der Koordinaten für die Begrenzung und andererseits zur absoluten und relativen Positionierung des Rasenmäher-Roboters während des eigentlichen Arbeitsprozesses, eingesetzt werden soll. Preiswertere dGPS-Einheiten sind ab ca. 3.500 \$ erhältlich, jedoch ein wenig ungenauer. Nach oben hin ist die Preisgrenze offen, wobei im Grunde keine weiteren relevanten Genauigkeitssteigerungen erkennbar sind. Somit scheint die gewählte Komponente ein guter Kompromiss für das zusammengestellte Robotersystem zu sein.

Zur Navigation wird eine kombinierte Pfadplanungsstrategie empfohlen, wobei automatisch ein Navigationspfad generiert werden soll, damit eine systematische Bearbeitung der zu mähenden Fläche nach parallelen Streifen realisiert werden kann. Zu Unterstützung der relativen Positionierung und Kursbeibehaltung soll ein hybrides System, bestehend aus einer kostengünstigen inertialen Messeinheit (MEMS-IMU), einem Odometer und einem digitalen Kompass verwendet werden. Dieses Ergänzungssystem ist in erster Linie als Backup-System anzusehen, das im Falle eines RTK-dGPS-Ausfalls weiterhin relative Positionsdaten liefert.

Im Bereich der Objekterkennung wird ebenfalls auf kostengünstige Technologie, in Form von Ultraschallsensoren, gesetzt, wobei dieses System von Berührungssensoren unterstützt werden soll. Als Ausweichstrategie würde die Umfahrung zum Einsatz kommen. Die Verwendung von in unteren Preisklassen angesiedelten LIDAR-Messeinheiten, wäre bei der bisherigen Komponentenauswahl hinsichtlich der festgelegten Preisobergrenze noch möglich, würde jedoch bei vergleichbarer Genauigkeit, allerdings auch bei höherer Zuverlässigkeit, zu enormen Mehrkosten führen. Die geringere Verlässlichkeit wird diesbezüglich in Kauf genommen, weswegen die Wahl auf Ultraschallsensoren in Kombination mit Berührungssensoren fiel.

Der Rasenmäher soll außerdem von aufladbaren Batterien angetrieben werden, da diese kostengünstiger als solarbetriebene Modelle sein sollen. Zusätzlich soll das Robotersystem über ein rudimentäres Graphical User Interface, Regen- und Kippsensoren und ein SMS-Störmeldesystem sowie eine SMS-Steuerung verfügen.

An dieser Stelle muss festgehalten werden, dass es sich bei den vorgeschlagenen Methoden und Komponenten nur um eine Möglichkeit innerhalb dieses künstlich geschaffenen Baukastensystems handelt. Die Wahl ist dabei von vielen Faktoren abhängig, wobei nicht immer alle berücksichtigt werden können.

10.2 Konzeption eines intelligenten Rasenmäher-Roboters

Auf der nächsten Seite stellt Abb. 71 einen stark vereinfachten Entwurf eines intelligenten Rasenmäher-Robotersystems dar, wobei die ausgewählten Komponenten (siehe Abb. 70)

schematisch und skizzenartig visualisiert sind. Die Konzeption und das Design kann als mögliche Umsetzung des vorgeschlagenen Systems verstanden werden.

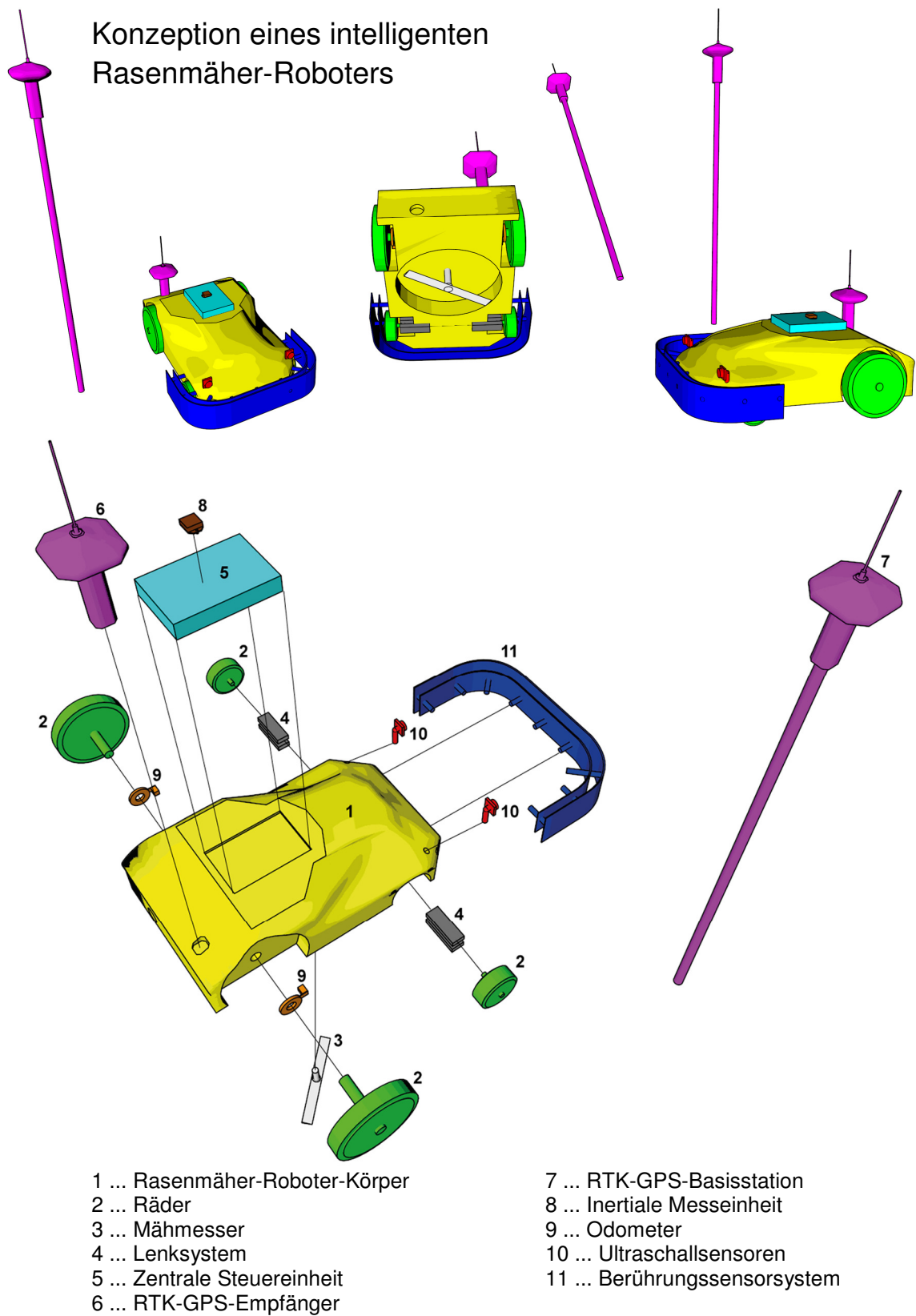


Abb. 71: Entwurf eines intelligenten Rasenmäher-Roboters

Kernstück des in Abb. 71 dargestellten Rasenmäher-Roboters ist dessen Körper (1), der stark vereinfacht dargestellt ist. Dieser beinhaltet unter anderem die nicht dargestellten Motoren für den Antrieb und Mähmesser sowie die aufladbaren Batterien. Die zusätzlichen Features, wie Regen- und Kippsensor sowie die GSM-Einheit zur Steuerung und Fehlermeldung, wurden ebenfalls bei der Skizzierung nicht berücksichtigt.

Das Herzstück des Robotersystems ist die zentrale Steuereinheit (5), die unter anderem den digitalen Kompass sowie das Graphical User Interface enthält und die Daten der Sensoren verarbeitet, anhand derer bestimmte Navigationsprozesse initiiert werden.

Die inertielle Messeinheit (8), die aufgrund der MEMS-Technologie wenig Raum benötigt, ist an zentraler Stelle angeordnet. Die beiden Odometer sind auf der Hinterachse des Rasenmähers montiert. Zwei Ultraschallsensoren (10) befinden sich auf der linken und rechten Vorderseite, wo auch das Berührungssensorsystem (11) montiert ist. Der RTK-GPS-Empfänger (6) befindet sich in ausreichender Entfernung zum Motor im hinteren Bereich des Roboters. Die dazugehörige Basisstation (7) kann an beliebige Stelle aufgestellt werden.

10.3 Beispielhafter Workflow eines intelligenten Rasenmäher-Roboters

Ein beispielhafter Workflow, der einem potentiellen intelligenten Rasenmäher-Robotersystem zugrunde liegt, ist vereinfacht in Abb. 72 auf der nächsten Seite dargestellt. Nach dem Erwerb muss der Käufer eine Systeminstallation durchführen. Dazu ist es im ersten Schritt notwendig, die Batterien aufzuladen. Anschließend wird die Basisstation an einen beliebigen Punkt positioniert, wobei eine Verbindung mit einer Referenzstation hergestellt werden muss, um die gewünschte Genauigkeit zu erlangen. In Österreich wäre beispielsweise die Einwahl in das kostenpflichtige APOS (Austrian Positioning Service) möglich. Über GSM werden Korrekturdaten von einer Referenzstation bereitgestellt und dabei eine so genannte Virtuelle Referenzstation erstellt. Aus diesem Grund ist es nicht zwingend notwendig eine eigene Basisstation zu installieren. Jedoch kann mit Hilfe einer physisch vorhandenen Basisstation in unmittelbarer Nähe die Lagegenauigkeit und Zuverlässigkeit deutlich gesteigert werden. Nach der Installation der Basis müssen die Grenzpunkte eingemessen werden. Dazu wird der Roboter an besagte Punkte transferiert, wobei Koordinaten aufgenommen werden, die mit Hilfe der Basisstation korrigiert werden. Das gleiche Prozedere ist für die Position der Ladestation notwendig. Wenn alle benötigten Koordinaten in das System eingespeist wurden, kann über das Graphical User Interface der Befehl zur Generierung eines Navigationspfades gegeben werden, wobei eine virtuelle Karte erstellt wird. Im letzten Installationsschritt muss nur noch die GSM-Konfiguration vorgenommen werden, damit der Roboter Fehlermeldungen per SMS versenden und per SMS

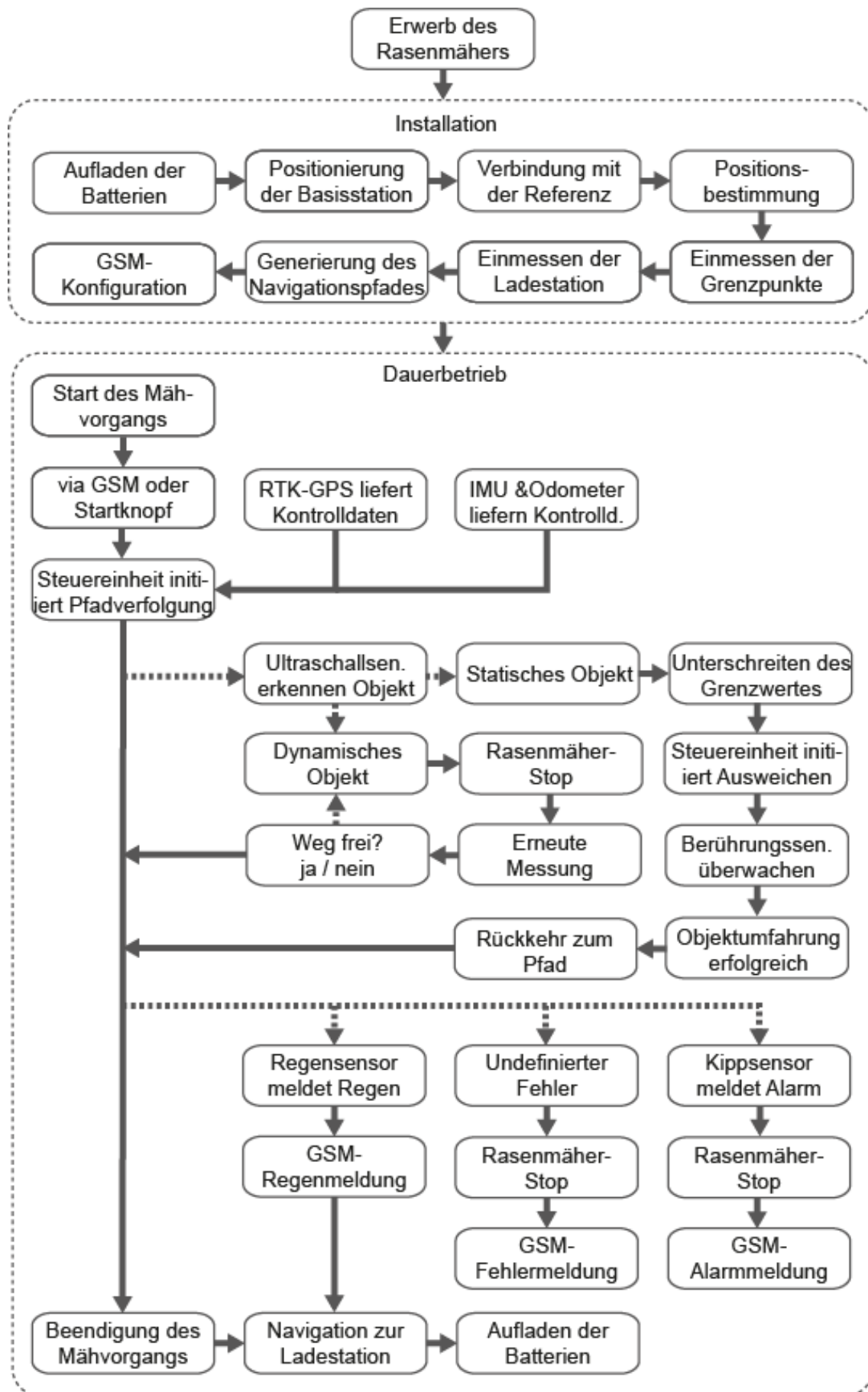


Abb. 72: Vereinfachter Workflow eines intelligenten Rasenmäher-Robotersystems

gestartet werden kann. Nach der Installation kann der Roboter via GSM oder den Startknopf gestartet werden. Dabei initiiert die zentrale Steuereinheit die Pfadverfolgung, wobei der RTK-GPS-Empfänger, die inertielle Messeinheit und die beiden Odometer Kontroll- bzw. Korrekturdaten liefern.

Treten keine Hindernisse oder Fehler auf, so mäht der Roboter so lange, bis die gesamte Fläche nach einer festgelegten Systematik abgegrast wurde und navigiert anschließend zurück zur Ladestation, wo die Batterien erneut geladen werden.

Im Falle einer Objekterkennung durch die Ultraschallsensoren wird gleichzeitig erkannt, ob es sich dabei um ein statisches oder dynamisches Hindernis handelt. Im ersten Fall verändert sich zunächst nichts. Erst nachdem ein bestimmter Grenzwert unterschritten wird, initiiert die zentrale Steuereinheit ein Ausweichmanöver, dass mit Hilfe der Berührungssensoren überwacht wird. Nach erfolgreichem Ausweichen kehrt der Rasenmäher-Roboter auf seinen eigentlich Pfad zurück. Wird hingegen ein dynamisches Objekt detektiert, wird der Rasenmäher gestoppt und nach einer bestimmten Zeit eine weitere Ultraschallmessung durchgeführt. Ist weiterhin ein dynamisches Objekt vorhanden, wiederholt sich die Abfolge von neuem. Ist der Weg jedoch frei, so nimmt der Rasenmäher-Roboter seinen Kurs wieder auf.

Bei einer gewissen Regenintensität schlagen die Regensensoren an. Die zentrale Steuereinheit gibt der GSM-Einheit den Befehl zur Regenmeldung per SMS. Gleichzeitig wird der aktuelle Navigationspfad abgebrochen und ein Rückkehrpfad zur Ladestation generiert. Kippt hingegen der Roboter um, so reagieren die dafür vorgesehenen Kippsensoren. Die zentrale Steuereinheit veranlasst, aus Gründen der Sicherheit, sofort einen Rasenmäher-Stop, damit die rotierenden Mähmesser niemanden verletzen oder Objekte beschädigen können. Im Anschluss daran wird eine GSM-Alarmmeldung ausgesendet. Bei undefinierbaren Fehlern handelt es sich um all jene Störfälle, die nicht auf Regen oder Umkippen zurückzuführen sind, beispielsweise bei Ausfällen von Sensoren. Tritt ein derartiger Fehler auf, so wird ein sofortiger Rasenmäher-Stop veranlasst, da die Sicherheit unter Umständen nicht mehr gewährleistet werden kann. Daraufhin folgt eine Fehlermeldung via SMS an den Besitzer.

Anhand des in Abb. 72 vereinfacht dargestellten Workflow eines idealen, intelligenten Rasenmäher-Robotersystems kann gezeigt werden, dass der Rasenmäher weitestgehend alleine und dabei genau und effizient arbeiten kann.

10.4 Optionales Graphical User Interface

Abb. 73 stellt auf der nächsten Seite einen graphischen Entwurf einer optionalen Benutzeroberfläche, in Form eines Mock-up Graphical User Interface, dar. Mit Hilfe einer derartigen Schnittstelle ist der Besitzer eines intelligenten Rasenmäher-Robotersystems in der

Lage, den Roboter während des Arbeitsprozesses zu steuern und zu überwachen. Der gezeigte Entwurf richtet sich in erster Linie an Besitzer eines Tablets und besteht aus sieben funktionellen Bereichen (siehe Abb. 74), die in weiterer Folge kurz beschrieben werden.



Abb. 73: Entwurf eines optionalen Graphical User Interface zur Steuerung und Überwachung eines intelligenten Rasenmäher-Robotersystems
Quelle Orthophoto: LFRZ, modifiziert

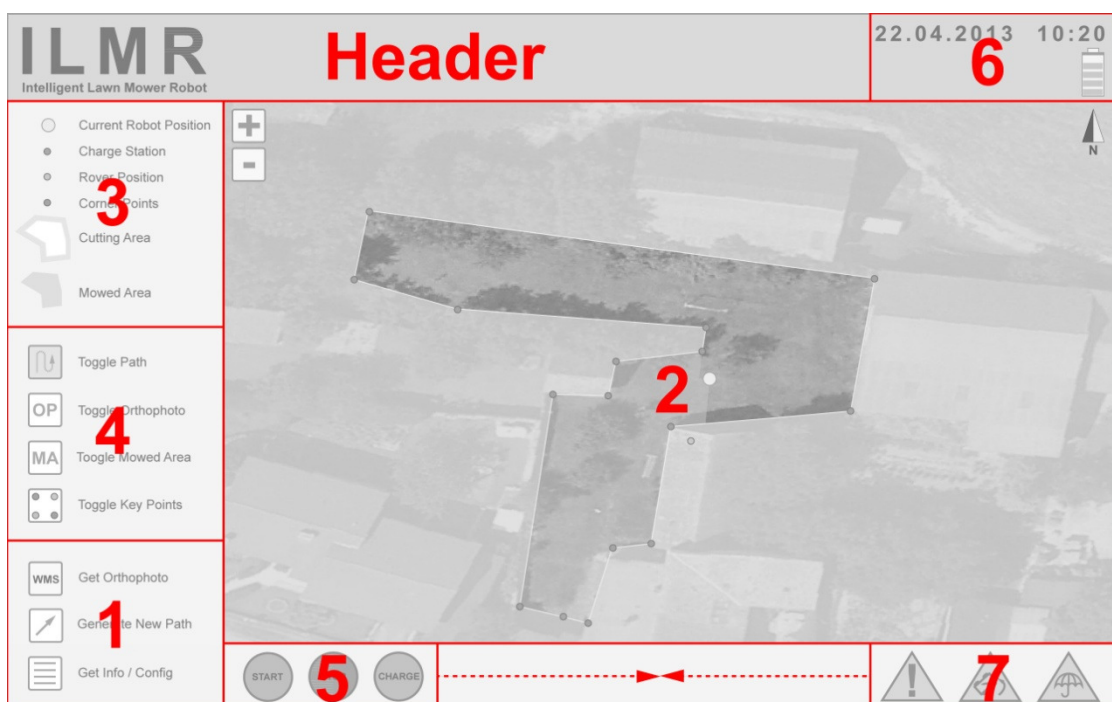


Abb. 74: Hervorgehobene Bereiche des optionalen Graphical User Interface
Quelle Orthophoto: LFRZ, modifiziert

- Konfigurationsbereich (1)

Über die Schnittstelle "Get Orthophoto" kann ein entzerrtes Luftbild über ein WMS (Web Map Service) geladen werden. In Österreich bietet beispielsweise das LFRZ (Luft-, forst- und wasserwirtschaftliches Rechenzentrum) einen derartigen Dienst an, der eine kostenlose, private Nutzung von hochauflösenden Orthophotos ermöglicht. Mittels "Generate New Path" kann ein neuer Navigationspfad generiert werden, wobei idealerweise eine Auswahl an bestimmten Mustern vorliegen sollte. Über "Get Info / Config" erhält der Besitzer eine Übersicht der aufgenommen Grenzpunkte und deren Koordinaten, die nachträglich verändert werden können. Zusammen bilden die drei genannten Funktionen den Konfigurationsbereich, der am linken unteren Bildrand positioniert ist.

- Karte (2) und Legende (3)

Das zentrale Element ist die Kartenübersicht. Über das geladene Orthophoto wird, auf Basis der Installation, die zu mähende Fläche dargestellt, die mit einer gelben Grenzlinie und roten Grenzpunkten abgesteckt ist. Zur besseren Veranschaulichung wird der äußere Bereich ausgegraut. Die Darstellung beinhaltet neben der fixen Position der Ladestation und der Basis- bzw. Roverstation auch die aktuelle Position des Rasenmähers sowie die bereits gemähte Rasenfläche. Außerdem ist eine Zoom-Funktion über die entsprechenden Plus- und Minus-Buttons möglich.

Alle dargestellten Kartenelemente sind auf der linken Bildseite im Bereich der Legende verankert und werden dort erläutert.

- Toggle-Bereich (4)

Optional stehen zusätzlich so genannte Toggle-Funktionen zur Verfügung, die es dem Anwender ermöglichen, Elemente ein- und auszublenden. Ausgeblendete Elemente sind im Menübereich auf der linken Seite ausgegraut. Aktive bzw. eingeblendete Bestandteile hingegen vollfarbig. In Abb. 73 sind beispielsweise das Orthophoto, die gemähte Fläche und die Schlüsselpunkte (Position der Lade- und Basisstation sowie des Roboters) eingeblendet. Der aktuelle Navigationspfad ist hingegen ausgeblendet.

- Steuerungsbereich (5)

Die wesentlichen Steuerelemente befinden sich am unteren Bildrand. Zur Auswahl stehen drei Buttons, mit denen der Benutzer den Roboter starten, stoppen und zur Ladestation schicken kann.

- Status- (6) und Alarmbereich (7)

Am rechten oberen Bildrand befindet sich der Statusbereich, in dem unter anderem Datum und Uhrzeit abgelesen werden können. Außerdem beinhaltet dieser Bereich die

Statusanzeige der Batterie des Rasenmäher-Roboters. Diese dient dazu, den Anwender rechtzeitig zu informieren, wenn der Roboter mittels "Charge"-Button zurück zur Ladestation geschickt werden soll.

Im rechten unteren Bildrand sind Warnhinweise angeordnet, die als erweiterte Statusanzeigen angesehen werden können. Das System unterscheidet drei verschiedene Alarmarten: "Undefinierter Fehler", "Kippen", "Regen" - v.l.n.r. dargestellt in Abb. 73. Tritt ein Problem auf, wird der Benutzer über ein nun rot dargestelltes Warnsymbol informiert.

In Abb. 74 ist neben den sieben funktionellen Bereichen eine Fläche für den Header vorgesehen. Darin können unter anderem die Bezeichnung und das Logo des Rasenmäher-Robotersystems sowie optionale Angaben zum Hersteller untergebracht werden. Außerdem ist zu erkennen, dass die Bereiche 5 (Steuerungsbereich) und 7 (Alarmbereich) je nach Produktausführung um zusätzliche Steuer- bzw. Kontrollfunktionen sowie Warnhinweise erweitert werden können.

Für die Nutzung dieser Benutzerschnittelle bei Smartphones, müsste ein neuer Entwurf erstellt werden, wobei die Implementierung von Drop-Down Menüs wahrscheinlich vorteilhaft wäre.

Das vorgeschlagene Robotersystem samt Konzeption, Workflow und Entwurf eines optionalen Graphical User Interface, kann als Diskussionsanreiz und damit zur Förderung der Forschung in diesem Bereich angesehen werden. Im nächsten und letzten Kapitel werden die einzelnen Forschungsergebnisse noch einmal kurz zusammengefasst, um diese Masterarbeit abzuschließen und abzurunden.

11 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Masterarbeit verfolgte das übergeordnete Ziel, einen kartographischen Beitrag innerhalb des interdisziplinären Forschungsfeldes der automatisierten Kleinraumnavigation zu leisten. Es handelt sich dabei, soweit dem Autor bekannt, um den ersten Beitrag eines Kartographen überhaupt zu diesem Thema. Aus diesem Grund bietet diese Arbeit einen umfassenden Überblick über die Thematik, die dadurch der kartographischen Fachwelt als Einstiegs- bzw. Basisliteratur dienen kann und als Ansporn für weitere kartographische Untersuchungen auf diesem interessanten Forschungsgebiet angesehen werden soll.

Das Ergebnis bietet unter anderem, neben einer kurzen Einführung in die Navigation, deren Teilbereiche - Lokalisation, Zielbestimmung und Fahrtwegermittlung - thematisiert wurden, einen tiefgreifenden Einblick in die Entwicklungsgeschichte von Rasenmäher-Robotern. Dabei konnte festgestellt werden, dass es zwar wesentliche Weiterentwicklungen seit der Geburtsstunde des ersten Rasenmäher-Roboters im Jahr 1995 zu verzeichnen gibt, aber gleichzeitig sich die zwar zuverlässige, jedoch äußerst ineffiziente Navigationsweise seither kaum verändert hat. Diese Tatsache liefert somit eine Rechtfertigung wissenschaftlicher Untersuchungen auf diesem Gebiet. Die Ergebnisse dieser Masterarbeit beziehen sich exemplarisch zwar auf Rasenmäher-Roboter, sind jedoch für den gesamten Bereich der Kleinraumnavigation verwertbar, beispielsweise bei Überwachungs-, Staubsauger-, Erkundungs- oder etwa bei Minensuchrobotern. Zusätzlich können auch Teilergebnisse in anderen Disziplinen verwendet werden, z.B. die statische und dynamische Objekterkennung im Bereich der Fußballroboter.

Zusätzlich bietet das Ergebnis eine, für den Umfang einer Masterarbeit, umfassende Untersuchung unterschiedlicher Methoden, Ansätze und Strategien in den Bereichen Datenerfassung und Navigationssysteme, im Kontext mobiler, autonomer Service-Roboter im Allgemeinen und Rasenmäher-Roboter im Speziellen. In diesem Zusammenhang wurde neben einer theoretischen Analyse der jeweiligen Verfahren auch versucht, deren Umsetzung bei Rasenmäher-Roboter-Prototypen zu veranschaulichen.

Im Zuge dieser Masterarbeit wurden insgesamt drei Forschungsfragen aufgegriffen und beantwortet. Die erste Forschungsfrage bezieht sich auf die Anforderungen, die hinsichtlich Funktionalität und Genauigkeit an intelligente Rasenmäher-Robotersysteme gestellt werden. Als intelligent können derartige Systeme dann angesehen werden, wenn diese mit Hilfe entsprechender Sensoren dazu in der Lage sind, sich selbstständig in einer begrenzten, bekannten oder unbekannten Umgebung kollisionsfrei zu bewegen und dabei den Rasen nach einer festgelegten Systematik in kürzester Zeit zu mähen und außerdem

statische und dynamische Objekte rechtzeitig zu erkennen und geeignete Ausweichstrategien zu initiieren. Zur Beantwortung dieser Frage wurde eine Expertenbefragung mit Hilfe einer Online-Umfrage durchgeführt. Im Rahmen der Auswertung wurde ein Bereichskatalog für Rasenmäher-Roboter aufgestellt, wobei die Bereiche "Grundkriterien", "Mähschema", "Form der Antriebsenergie", "Lagegenauigkeit", "Bedienbarkeit", "Statische / Dynamische Objekterkennung", "Begrenzungsmethode", "Navigationsweise" und "Zusätzliche Features" unterschieden werden. Für jeden dieser Bereiche wurden Anforderungen und Erwartungen, auf Basis der Befragung, extrahiert. Eine detaillierte Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Kapitel 6.3 nachzulesen.

Die zweite Forschungsfrage diente dazu, herauszufinden, wo die Grenzen bei lokalen, autonomen Navigationssystemen hinsichtlich geometrischer und zeitlicher Auflösung, im Einsatzbereich von Service-Robotern, liegen. Eine eingehende Literaturrecherche diente in einem ersten Schritt dazu überhaupt herauszufinden, welche Methoden und Techniken für einen dementsprechenden Einsatz überhaupt in Frage kommen. Im zweiten Schritt wurden einerseits potenzielle Datenerfassungsmethoden, wie GNSS, inkl. dGNSS und RTK-GNSS, Informationsextraktion aus hochauflösenden Karten, inertiale Messsysteme, Ultraschallsysteme, GSM und WPS, Echtzeit-Tachymeter sowie SLAM-Methoden unter die Lupe genommen. Andererseits wurden im Bereich der Navigation verschiedene Methoden zur Grenzziehung, Koppelnavigationssysteme, unterschiedliche Pfadplanungs- und Ausweichstrategien sowie Systeme zur Objekterkennung einer genaueren Betrachtung unterzogen. Die detaillierten Ergebnisse der Untersuchung sind in Kapitel 7.3 für den Bereich der Datenerfassung und im Kontext von Navigationssystemen und -strategien in Kapitel 8.6 nachzulesen.

Die Antworten auf die beiden ersten Forschungsfragen dienten als Ausgangslage für die Bearbeitung der dritten und letzten Forschungsfrage, die darauf abzielte herauszufinden, inwiefern die gegenwärtige Technologie dazu in der Lage ist, die gestellten Anforderungen, die mit Hilfe der ersten Forschungsfrage ermittelt wurden, zu erfüllen. Anhand einer Gegenüberstellung der Forschungsergebnisse, konnte festgestellt werden, dass in sämtlichen Bereichen die Anforderungen erfüllt werden können. Die Realisierung intelligenter Rasenmäher-Roboter ist somit schon heute möglich. Allerdings sind in einigen Bereichen noch Verbesserungen durchaus vorstellbar, vor allem im Rahmen der Pfadplanungsstrategien. Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse ist in Kapitel 9 nachzulesen.

Zusätzlich wurde in Kapitel 10 ein "ideales" intelligentes Rasenmäher-Robotersystem zusammengestellt, wobei an dieser Stelle festgehalten werden muss, dass es sowas eigentlich nicht geben kann, da unterschiedliche Anwendungsbereiche andere Komponenten verlangen (können). Beispielsweise ist der Einsatz eines Objekterkennungssystems nur

dann sinnvoll, wenn auch tatsächlich statische oder dynamische Hindernisse auf der zu mähenden Rasenfläche auftauchen können, wie etwa im hauseigenen Garten in Form von Blumenbeeten, Swimming Pool, spielenden Kindern, Haustieren, usw. Andere Situationen erfordern dies hingegen nicht, etwa dann, wenn z.B. ein Fußballfeld gemäht werden soll. In diesem Fall sind Hindernisse auf dem Feld im leeren Stadion auszuschließen, weswegen der Roboter nicht zwingend mit einem entsprechenden Objekterkennungssystem ausgestattet sein muss. Nichtsdestotrotz wurde ein, auch als Diskussionsanreiz zu verstehendes und unter Führungszeichen stehendes ideales Rasenmäher-Robotersystem, zusammengestellt, wobei für jeden Bereich Methoden und Strategien sowie Komponenten, unter Berücksichtigung des jeweiligen PreisLeistungsverhältnisses, ausgewählt wurden. Zur besseren Veranschaulichung wurde des Weiteren ein graphischer Entwurf eines derartigen Systems erstellt und ein beispielhafter Workflow vom Kauf bis zum Dauerbetrieb beschrieben sowie die Oberfläche eines optionales Graphical User Interface entworfen.

Die bedeutendste Erkenntnis dieser Forschungsarbeit ist, dass die Realisierung intelligenter Rasenmäher-Robotersysteme schon heute möglich ist. Veranstaltungen wie die ION Robotic Lawn Mower Competition haben daran einen großen Anteil. Bedauerlicherweise war der Wettbewerb im Jahr 2012 der letzte seiner Art, da nach neun Jahren nun andere Forschungsobjekte gefördert werden sollen. Somit bleibt zu hoffen, dass auch trotzdem weiterhin Forschungsteams aus aller Welt sich diesen speziellen Themen widmen und zur Weiterentwicklung im Bereich der automatisierten Kleinraumnavigation einen Teil beitragen. Dieser Appell zur Systemverbesserung richtet sich aber auch vor allem an die Entwickler im industriellen Bereich, denen diese Masterarbeit übermittelt werden wird. Die Möglichkeit wurde mit dieser Arbeit festgestellt. Nun liegt es bei den Verantwortlichen, die präsentierten Ergebnisse aufzugreifen und entsprechende Untersuchungen und Weiterentwicklungen in die Wege zu leiten.

QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS

Verwendete Literatur:

- [AKE-08] AKERS E. u. A. AGAH, 2008: Large-Scale Localization Using Only a Camera. In: 2008 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications, TePRA. Woburn 2008, S.25-30
- [BAD-12] BADINO H. u. D. HUBER, T. KANADE, 2012: Real-Time Topometric Localization. In: Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul 2012, S. 1635-1642
- [BAL-08] BALOCH T.M. u. T.T.C. KAE, 2008: Design and modelling a prototype of a robotic lawn mower. In: Proceedings Symposium on Information Technology 2008, ITSIm, Kuala Lumpur, Code 74115
- [BÖS-12] BÖSER W., et.al. (Hrsg.), 2012: Geomatik aktuell 2012: Präzise Navigation und mobile Geodatenerfassung - Out- und Indoor. Aus: Karlsruher Geowissenschaftliche Schriften, Reihe B: Vermessungswesen und Photogrammetrie, Bd. 7
- [BRU-02] BRUCH M.H. u. G.A. GILBREATH, J.W. MUELHAUSER, J.Q. LUM, 2002: Accurate waypoint navigation using non-differential GPS. AUVSI Unmanned Systems, Juli 9-11
- [CEN-08] CEN G. u. N. MATSUHIRA, J. HIROKAWA, H. OGAWA, I. HAGIWARA, 2008: Mobile Robot Global Localization Using Particle Filters. In: International Conference on Control, Automation and Systems. Seoul 2008, S. 710-713
- [CHO-11] CHOI H. u. E. KIM, Y. W. PARK, C. H. KIM, 2011: Map Management System for cv-SLAM. In: URAI 2011 – 2011 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). Incheon 2011, S. 55-57

- [DAL-10] DALTORIO K.A. u. A.D. ROLIN, J.A. BENO, B.E. HUGHES, A. SCHEPELMANN, M.S. BRANICKY, R.D. QUINN, J.M. GREEN, 2010: An Obstacle-Edging Reflex for an Autonomous Lawnmower. In: IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, PLANS 2010, Indian Wells, Code 81274
- [DEA-11] DE ALMEIDA A.T. u. J. FONG, 2011: Domestic Service Robots. In: IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 18, Issue 3, September 2011, S. 18-20
- [FEY-00] FEYRER S., 2000: Detektion, Lokalisierung und Verfolgung von Personen mit einem mobilen Serviceroboter. Dissertation der Fakultät für Informatik der Eberhard-Karls-Universität Tübingen zur Erlangung des Grades Doktor der Naturwissenschaften
- [FU-12] FU L.-S. u. Y.-Y. XING, 2012: The visual extraction of the autonomous lawnmower navigation route. In: Applied Mechanics and Materials, Vol. 157-158, 2012, S. 1458-1464
- [HAK-02] HAKE G. u. D. GRÜNREICH, L. MENG, 2002: Kartographie. Visualisierung raum-zeitlicher Information. 8., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage
- [HIC-00] HICKS I. u. R. WARREN, E.L. HALL, 2000: Survey of robot lawn mowers. In: Proceedings of SPIE - The International Society of Optical Engineering, Vol. 4197, 2000, S. 262-269
- [HSU-10] HSU P.-M. u. C.-L. LIN, 2010: Optimal Planner for Lawn Mowers. In: 2010 IEEE 9th International Conference on Cybernetic Intelligent Systems, CIS 2010, Artikelnr. 5898126
- [HUA-10] HUANG G.-S. u. H.-C. LIN, K.-C. LIN, S.-H. KAO, 2010: Intelligent auto-saving energy robotic lawn mower. In: 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, SMC 2010, Istanbul, S. 4130-4136

- [JÄG-12] JÄGER R., 2012: Profil, Grundlagen und aktuelle Entwicklungen der präzisen Navigation. In: BÖSER W., et.al., 2012: Geomatik aktuell 2012: Präzise Navigation und mobile Geodatenerfassung - Out- und Indoor. Aus: Karlsruher Geowissenschaftliche Schriften, Reihe B: Vermessungswesen und Photogrammetrie, Bd. 7, S. 9-24
- [LEE-12] LEE S. u. S. LEE, S. BAEK, 2012: Vision-Based Kidnap Recovery with SLAM for Home Cleaning Robots. In: Journal of Intelligent and Robotic Systems. Theory and Applications, Vol. 67, Issue 1, Juli 2012, S. 7-24
- [LIU-10] LIU R. u. Y. WANG, G. WANG, 2010: A Rapid Geometry Localization Method for Omni-directional Vision Soccer Robot. In: Proceedings – 2nd International Conference on Information Technology and Computer Science. Kiev 2010, S. 150-153
- [LUC-10] LUCA R. u. F. TROESTER, R. Gall, C. SIMION, 2010: Feature based mapping procedure with application on Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). In: Solid State Phenomena Vols. 166-167, 2010, S. 265-270
- [LV-11] LV K. u. J. SU, X. CHEN, 2011: Self-localization for robot based on the white line. In: Advanced Materials Research, Vols. 308-310, 2011, S. 1375-1378
- [MEL-12] MELITA C.D. u. G. MUSCATO, M. PONCELET, 2012: A Simulation Environment for an Augmented Global Navigation Satellite System Assisted Autonomous Robotic Lawn-Mower. In: Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, S. 1-16
- [MÜL-12] MÜLLER T. u. A. HOSCISLAWSKI, 2012: Sensoren für Navigationsplattformen. In: BÖSER W., et.al., 2012: Geomatik aktuell 2012: Präzise Navigation und mobile Geodatenerfassung - Out- und Indoor. Aus: Karlsruher Geowissenschaftliche Schriften, Reihe B: Vermessungswesen und Photogrammetrie, Bd. 7, S. 25-32
- [NOU-06] NOURANI-VATANI N. u. M. BOSSE, J. ROBERTS, M. DUNBABIN, 2006: Pratical path planning and obstacle avoidance for autonomous mowing. In: Proceedings of the Australasian Conference of Robotics and Automation.

- [OUS-07] OUSINGSAWAT J. u. M.G. EARL, 2007: Modified lawn-mower search pattern for areas comprised of weighted regions. In: Proceedings of the American Control Conference, 2007, Artikelnr. 4282850, S. 918-923
- [PAU-10] PAUL G., 2010: Aktuelle Vermessungsmethoden. Satellitengestützte Vermessung, Inertiale Vermessung, Laserscanning. Unterlagen zur Lehrveranstaltung Terrestrische Datenerfassung, Kapitel 6, Universität Wien, WS 2010/11
- [ROM-12] ROMERO A. u. M. CAZORLA, 2012: Topological visual mapping in robotics. In: Cognitive Process, 2012, S. 1-4
- [SAL-12] SALER H. u. J. UHL, 2012: Geodatenstrukturen für Indoor-Navigation. In: BÖSER W., et.al., 2012: Geomatik aktuell 2012: Präzise Navigation und mobile Geodatenerfassung - Out- und Indoor. Aus: Karlsruher Geowissenschaftliche Schriften, Reihe B: Vermessungswesen und Photogrammetrie, Bd. 7, S. 115-134
- [SCHa-09] SCHEPELMANN A. u. H.H. SNOW, B.E. HUGHES, F.L. MERAT, R.D. QUINN, J.M. GREEN, 2009: Vision-based obstacle detection and avoidance for the CWRU cutter autonomous lawnmower. In: 2009 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications, TePRA 2009, Artikelnr. 5339616, S. 218-223
- [SCHb-10] SCHEPELMANN A. u. R.E. HUDSON, F.L. MERAT, R.D. QUINN, 2010: Visual segmentation of lawn grass for a mobile robotic lawnmower. In: IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings, Artikelnr. 5650430, S. 734-739
- [SCHc-12] SCHERER S. A. u. D. DUBE, A. ZELL, 2012: Using Depth in Visual Simultaneous Localisation and Mapping. In: Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul 2012, S. 5216-5221
- [SHI-08] SHIU B.-M. u. C.-L. LIN, 2008: Design of an Autonomous Lawn Mower with Optimal Route Planning. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 2008, Artikelnr. 4608497

- [SMI-05] SMITH J. u. S. CAMPBELL, J. MORTON, 2005: Design and implementation of a control algorithm for an autonomous lawnmower. In: Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol. 2005, Artikelnr. 1594136, S. 456-459
- [SOL-12] SOLANKI D. u. V. KHARE, 2012: Optical Navigation System for Robotics Application. In: Proceedings - 3rd International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation, ISMS 2012. Kinabalu 2012, S. 268-272
- [SOM-12] SOMMER J. u. W. ROSENSTIEL, 2012: Infrastruktursensor-basierte Navigation. In: BÖSER W., et.al., 2012: Geomatik aktuell 2012: Präzise Navigation und mobile Geodatenerfassung - Out- und Indoor. Aus: Karlsruher Geowissenschaftliche Schriften, Reihe B: Vermessungswesen und Photogrammetrie, Bd. 7, S. 43-50
- [TSA-11] TSAI S.-H. u. C.-H. SU, C.-H. CHANG, C.-T. LIN, C.-C. WEN, J.H. LI, 2011: Based on fuzzy color detection and field calibration for robot soccer. In: 1st International Conference on Robot, Vision and Signal Processing. Kaohsiung 2011, S. 86-89
- [WAS-11] WASIF M., 2011: Design and implementation of autonomous Lawn-Mower Robot controller. In: 2011 7th International Conference in Emerging Technologies, ICET 2011, Artikelnr. 6048466
- [XIE-10] XIE J. u. F. NASHASHIBI, M. PARENT, O. Garcia FAVROT, 2010: A Real-Time Robust Global Localization for Autonomous Mobile Robots in Large Environments. In: 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Singapore 2010, S. 1397-1402
- [YI-12] YI Y. u. Y. HUI, 2012: Simultaneous Localization and Mapping with Identification of Landmarks based on Monocular Vision. In: Advanced Materials Research, Vol. 366, S. 90-94
- [ZHA-09] ZHANG Lei, R. ZAPATAS, P. LÉPINAY, 2009: Self-Adaptive Monte Carlo Localization for Mobile Robots Using Range Sensors. In: 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009. St. Louis 2009, S. 1541-1546

- [ZWI-12] ZWIENER J. u. J. DIEKERT, 2012: Multisensorfusion zur autonomen Navigation und Objektgeoreferenzierung. In: BÖSER W., et.al., 2012: Geomatik aktuell 2012: Präzise Navigation und mobile Geodatenerfassung - Out- und Indoor. Aus: Karlsruher Geowissenschaftliche Schriften, Reihe B: Vermessungswesen und Photogrammetrie, Bd. 7, S. 33-41

Online-Literatur

Letzter Zugriff am 20.12.2012

- [URLa-01] UEzMOW 3.1.1 Autonomous Lawn Mower. Technical Design Report
<http://www.ion.org/satdiv/alc/reports2010/EVAN2010.pdf>
- [URLa-02] Grass Shredding Unit. Design Report
<http://www.ion.org/satdiv/alc/reports2010/EVAN2010.pdf>
- [URLa-03] Autonomous Lawnmower Mini-Mow. Technical Report
<http://www.ion.org/satdiv/alc/reports2010/CedarvilleUniversity2010.pdf>
- [URLa-04] G. Tech. Autonomous Lawnmower
<http://www.ion.org/satdiv/alc/reports2010/UniversityofNorthFlorida2010.pdf>
- [URLa-05] CWRU Cutter IV. Case Western Reserve University's Autonomous Robotic Lawn Mower
<http://www.ion.org/satdiv/alc/reports2010/CWRU2010.pdf>
- [URLa-06] InstiGator. Technical Report 2010
<http://www.ion.org/satdiv/alc/reports2010/UniversityofFlorida2010.pdf>
- [URLa-07] Autonomous Lawnmower with Low Cost Components and Open Source Software
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2012/09/2012_Report_Syracuse.pdf
- [URLa-08] Deep Green. University of New Haven Robotics Club Autonomous Lawnmower
<http://www.ion.org/satdiv/alc/reports2010/UniversityofNewHavenLawnmowerReport2010.pdf>

- [URLa-09] WrightBot. Intelligent Robotic Lawnmower Design Team. Technical Design Report
<http://www.ion.org/satdiv/alc/reports2010/WrightStateUniversity2010.pdf>
- [URLa-10] Wright State University's Lawn Raiders
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2012/09/2012_Report_WrightState.pdf
- [URLa-11] CWRU Cutter Cinco. Case Western Reserve University's Autonomous Robotic Lawn Mower
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2012/09/2012_Report_Case.pdf
- [URLa-12] Auburn University Automow Team Report
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2012/09/2012_Report_Case.pdf
- [URLa-13] S.E.A.L. (Solar Electric Autonomous Lawnmower)
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2012/09/2012_Report_SouthernPoly.pdf
- [URLa-14] Redblade: Miami University's Multi-functional Autonomous Robot
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2012/09/2012_Report_Miami.pdf
- [URLa-15] Lawn Transformer. CSUF Autonomous Lawnmower Entry 2012
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2012/09/2012_Report_Fullerton.pdf
- [URLa-16] BIGFOOT: An Autonomous Lawnmower
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2012/09/2012_Report_Dearborn.pdf
- [URLa-17] Moogie the Robotic Lawnmower
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2011/12/2011_WSU2_Moogie.pdf
- [URLa-18] Green Reaper II
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2011/12/2011_UNorthFlorida_Green_Reaper_II_ProX.pdf
- [URLa-19] Autonomous Grass Muncher
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2011/12/2011_UNorthFlorida_Green_Reaper_II_ProX.pdf
- [URLa-20] InstiGator. Technical Report 2011
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2011/06/Florida_InstiGator.pdf

- [URLa-21] Autonomous Wright State Mower Mows Outstandingly and Wonderfully (A.W.S.U.M.M.O.W.)
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2011/06/WSU1_AWSUMMOW_Report.pdf
- [URLa-22] The Ninth Annual Robotic Lawn Mower Competition Rulebook. Revision 2012.11
http://robomow.ion.org/wp-content/uploads/2012/05/Robotic_Lawnmower_Rules_2012_v01_1_2012-05-09.pdf
- [URLa-23] SEEBER G u. M. SCHMITZ: Methodik der GPS- und DGPS-Messung. Geoinformatik_online, Ausgabe 1/96
http://gio.uni-muenster.de/beitraege/ausg96_1/schmitz_meth_gps/iwu-pap2.htm
- [URLa-24] BJERKNES J. D. u. W. Liu, A. FT WINFIELD, C. MELHUISH: Low Cost Ultrasonic Positioning System for Mobile Robots
http://www.ias.uwe.ac.uk/~a-winfie/Bjerknes_etal_TAROSo7.pdf
- [URLa-25] STEMPFHUBER W. u. H. KIRSCHNER: Kinematische Leistungsfähigkeit von zielverfolgenden Tachymetern – Ein Beitrag zum Stand der Technik am Beispiel des Leica TPS1200+
https://edit.ethz.ch/geometh/people/former_staff/stwerner/AVN_TPS1200plus.pdf

Weitere Online Quellen

Letzter Zugriff am 20.12.2012

- [URLb-01] ION Robotic Lawn Mower Competition
<http://robomow.ion.org/>
- [URLb-02] Bericht über Rasenmäher-Unfälle in den USA
http://www.focus.de/panorama/welt/usa_aid_107772.html
- [URLb-03] Bericht über Rasenmäher-Unfälle in Deutschland
<http://www.shortnews.de/id/762179/7-000-Unfalle-pro-Jahr-mit-Rasenmahern>
- [URLb-04] Bericht über statistische Daten von Allergien
http://www.suf.at/allergie/all_statdaten.php

- [URLb-05] Die Geschichte des Rasenmähers
<http://www.gartenwerkzeug.org/rasenmaeher>
- [URLb-06] Belrobotics
<http://www.belrobotics.com>
- [URLb-07] Ortung und Positionsbestimmung mit Mobilfunk
<http://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1201061.htm>
- [URLb-08] GeoDZ - Das Lexikon der Erde
<http://www.geodz.com/>
- [URLb-09] International Federation of Robotics
<http://www.ifr.org/>
- [URLb-10] Die Geschichte der Rasenmäher-Roboter
<http://www.myautomower.de/MyAutomower/Geschichte/geschichte.html>
- [URLb-11] Funktionsweise eines Rasenmäher-Roboters: Animation
<http://www.myautomower.de/MyAutomower/Demo/demo.html>
- [URLb-12] Funktionsprinzip von Induktionsschleifen
http://www.rn-wissen.de/index.php/Begrenzungsschleife_-_Induktionsschleife
- [URLb-13] Auflistung unterschiedlicher Rasenmäher-Roboter, inkl. Beschreibung
<http://www.mower.ch>
- [URLb-14] Institute of Electrical and Electronics Engineers
<http://www.ieee.org>
- [URLb-15] Lawn Mower World - Museum
<http://www.lawnmowerworld.co.uk/>

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Erster Rasenmäher der Welt von E.B. BUDDING, 1830.....	1
Abb. 2: "Solarmower" von Husqvarna, 1995. Der erste Rasenmäher-Roboter auf dem Markt.....	2
Abb. 3: Die Stellung der Kartographie innerhalb des vorliegenden Forschungsfeldes	3
Abb. 4: Teilbereiche der Navigation. Vereinfachte Darstellung für den 2 dimensional Raum	9
Abb. 5: Teil-, bzw. Problembereiche der Navigation im weiteren Sinne	11
Abb. 6: Mähprinzip nach zufälligem Muster eines herkömmlichen, kommerziellen Rasenmäher-Roboter	16
Abb. 7: Logo der ION Robotic Lawn Mower Competition.....	19
Abb. 8: Felder des statischen (l) und dynamischen (r) Wettbewerbes der ION Robotic Lawn Mower Competition.....	19
Abb. 9: Navigationsprobleme von Robotern und deren Komplexität	21
Abb. 10: Ergebnis der Frage "Besitzen Sie einen Rasenmäher?" und Anteil der Rasenmäher-Roboter	28
Abb. 11: Anteil der Probandengruppen an der Online-Umfrage	28
Abb. 12: Einschätzung der Effizienz des Begrenzungssystems für Rasenmäher-Roboter mittels Induktionsschleife.....	29
Abb. 13: Bevorzugtes Mäh-Schema von Rasenmäher-Roboter	30
Abb. 14: Bedeutung des zugrundeliegenden Mäh-Schemas	30
Abb. 15: Bevorzugte Energieform für Rasenmäher-Roboter	31
Abb. 16: Bedeutung der verwendeten Energieform	31
Abb. 17: Bevorzugte geometrische Genauigkeit für ein intelligentes Navigationssystem für Rasenmäher-Roboter	32
Abb. 18: Bedeutung der geometrischen Genauigkeit im Kontext von Rasenmäher-Roboter	32
Abb. 19: Vertrautheit mit Globalen Navigationssatellitensystemen.....	33
Abb. 20: Einschätzung der Genauigkeit von GNSS, dGNSS und RTK-GNSS	33
Abb. 21: Genauigkeit von digitalisierten, großmaßstäbigen Karten zur absoluten Positionierung von Rasenmäher-Roboter	34
Abb. 22: Genauigkeitseinschätzung von Daten, basierend auf terrestrischen Vermessungen (z.B. mit Theodoliten) zur absoluten Positionierung von Rasenmäher Roboter.....	35
Abb. 23: Bevorzugte Methode zur absoluten Positionierung	36

Abb. 24: Bewertung der Sinnhaftigkeit eines Einsatzes einer inertialen Messeinheit für Rasenmäher-Roboter	37
Abb. 25: Vertrautheit mit dem Begriff "SLAM"	37
Abb. 26: Bewertung der Sinnhaftigkeit eines Einsatzes von SLAM-Methoden für Rasenmäher-Roboter	38
Abb. 27: Bevorzugte Alternativmethode zur Begrenzung der zu mähenden Fläche.....	38
Abb. 28: Bewertung der Effizienz der Navigation mittels vordefinierten Wegpunkten	39
Abb. 29: Bewertung der Effizienz der Navigation mittels Koppelnavigation	40
Abb. 30: Ergebnis der Befragung über den Einsatz eines Graphical User Interfaces bei Rasenmäher-Roboter	40
Abb. 31: Bevorzugte Methode zur Erkennung von Objekten	41
Abb. 32: Bewertung der Effizienz von unterschiedlichen Methoden zur Erkennung von Objekten	42
Abb. 33: Akzeptierte Verkaufspreisspanne von Rasenmäher-Roboter	43
Abb. 34: Ermittlung der Bedeutung ausgewählter Kriterien für Rasenmäher-Roboter.....	45
Abb. 35: Können intelligente Rasenmäher-Roboter in absehbarer Zukunft Marktreife erlangen?	46
Abb. 36: Bedeutungsausmaß der Bereiche eines intelligenten Rasenmäher-Roboters.....	47
Abb. 37: Bereichskatalog für Rasenmäher-Roboter.....	48
Abb. 38: Übersicht von Navigationssatellitensystemen (Auszug)	53
Abb. 39: Bezugssystem für satellitengestützte Vermessungen	54
Abb. 40: GPS-Systemarchitektur	55
Abb. 41: Vereinfachte Darstellung eines räumlichen Bogenschnitts	57
Abb. 42: Konstellation einer absoluten Positionierung	58
Abb. 43: Konstellation einer relativen Positionierung.....	60
Abb. 44: Vereinfachte Darstellung zur zweidimensionalen Positionsbestimmung mittels Trilateration.....	68
Abb. 45: Dichotomie zwischen Kartierung und Lokalisierung	71
Abb. 46: Datenerfassungsmethoden im Vergleich.....	74
Abb. 47: Intelligente Rasenmäher-Robotersysteme - Übersicht	75
Abb. 48: Eingabe von Grenzpunktkoordinaten über ein Graphical User Interface	76
Abb. 49: Abfolge der Extraktion einer weißen Begrenzungslinie	78
Abb. 50: v.l.n.r. Graustufenbild, Hough-Transformation, Verbesserte Hough-Transformation.....	78
Abb. 51: Vergleich zwischen Odometrie und GPS	80
Abb. 52: Algorithmus-Hierarchie eines Rasenmäher-Roboters	81
Abb. 53: Pfadplanungsstrategie des "SUMo" Rasenmäher-Roboters.....	82

Abb. 54: Farming Algorithmus des UEzMOW 3.1.1.....	83
Abb. 55: Boustrophedon-Path Mähmuster des Auburn University Robotic Lawnmower .	83
Abb. 56: Vereinfachung des Verarbeitungsprozesses durch Rotation der Fläche.....	84
Abb. 57: Normalisierung der Ausrichtung	84
Abb. 58: v.l.n.r. Pfade des Zeitspar-, Energiespar- und Mixmodus.....	86
Abb. 59: Gewichtung von Regionen.....	88
Abb. 60: Graphische Darstellung von Ausweichstrategien	90
Abb. 61: Schwenkbarer Laserscanner	91
Abb. 62: Aufteilung des FOV in sechs Quadranten	92
Abb. 63: Mögliche Ausführungsart von Berührungssensoren.....	95
Abb. 64: Eingabemöglichkeit von way points über ein Graphical User Interface.....	96
Abb. 65: Geglätteter und ungeglätteter GPS-Track	97
Abb. 66: Simulation einer Pfadverfolgung.....	97
Abb. 67: Strategie zur besseren Abdeckung der Eckbereiche.....	98
Abb. 68: Ergebnis der Untersuchung unterschiedlicher Navigationssysteme und - strategien.....	99
Abb. 69: Bewertung der Realisierbarkeit einzelner Bereiche von intelligenten Rasenmäher-Robotern mit Hilfe gegenwärtiger Technologien.....	102
Abb. 70: Bestandteile eines fiktiv-idealen intelligenten Rasenmäher-Roboters.....	106
Abb. 71: Entwurf eines intelligenten Rasenmäher-Roboters.....	108
Abb. 72: Vereinfachter Workflow eines intelligenten Rasenmäher-Robotersystems	110
Abb. 73: Entwurf eines optionalen Graphical User Interface zur Steuerung und Überwachung eines intelligenten Rasenmäher-Robotersystems	112
Abb. 74: Hervorgehobene Bereiche des optionalen Graphical User Interface	112

ANHANG

Im Folgenden werden Screenshots des Online-Fragebogens dargestellt. Dabei handelt es sich um die deutschsprachige Version, bei der auch sämtliche Gabelungsfragen ersichtlich sind. Die dargestellte Umfrage ist als Musterfragebogen anzusehen, dessen Antworten willkürlich getroffen wurden.



Automatisierte Kleinraumnavigation innerhalb eines autonomen, lokalen Systems

Deutsch (Du-Form) ▾



Sehr geehrter Teilnehmer, sehr geehrte Teilnehmerin!

Die vorliegende Online-Umfrage ist Teil meiner Masterarbeit am Institut für Geographie und Regionalforschung, Fachbereich Kartographie und Geoinformation, der Universität Wien. Der Arbeitstitel dieser Arbeit lautet: "Automatisierte Kleinraumnavigation innerhalb eines autonomen, lokalen Systems - Anforderungen, Limitierungen und Möglichkeiten eines Geographischen Informationssystem für Rasenmähe-Roboter"

Die Beantwortung der Fragen wird in etwa zehn bis 15 Minuten in Anspruch nehmen. Die Auswertung zielt darauf ab herauszufinden, welche Anforderungen ein Geographisches Informationssystem für Rasenmäher-Roboter erfüllen soll.

Ihre Angaben werden natürlich anonym und vertraulich behandelt!

Ich möchte mich herzlich für Ihre Mitarbeit bedanken. Für weitere Informationen stehe ich Ihnen natürlich gerne zur Verfügung.

Vielen Dank!

Gilbert Kotzbek

gilbert.kotzbek@univie.ac.at



Automatisierte Kleinraumnavigation innerhalb eines autonomen, lokalen Systems

0% 100%

Deutsch (Du-Form) ▼

* 1) Besitzen Sie einen Rasenmäher?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ ja
☐ nein

* 1a) Handelt es sich dabei um einen Rasenmäher-Roboter?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ ja
☐ nein

* 2) Sie wurden aufgrund Ihrer Arbeit mit Rasenmäher-Roboter ausgewählt diesen Fragebogen auszufüllen. Welchem der folgenden Bereiche würden Sie Ihre Tätigkeit zuordnen?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☐ Forschung & Entwicklung im wissenschaftlichen Bereich
☐ Forschung & Entwicklung im industriellen Bereich
☒ Vermarktung und verkauf

Umfrage verlassen und löschen

Später Fortfahren

<< Zurück

Weiter >>



Automatisierte Kleinraumnavigation innerhalb eines autonomen, lokalen Systems

0% 100%

Deutsch (Du-Form) ▼

Dieser Frageblock beinhaltet spezifische Fragen, um herauszufinden, welche Anforderungen ein Geographisches Informationssystem für Rasenmäher-Roboter erfüllen soll.

*

3) Die meisten aktuell käuflich zu erwerbenden Rasenmäher-Roboter operieren innerhalb ausgelegter bzw. eingetragener Induktionsschleifen.

Wie effizient schätzen Sie dieses Begrenzungssystem ein?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ sehr effizient ☐ effizient ☐ ausreichend ☐ wenig effizient ☐ nicht effizient ☐ kann ich nicht beurteilen

* 4) Nach welchem Schema sollte Ihrer Meinung nach eine Rasenfläche idealerweise gemäht werden?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ per Zufallsmuster
☐ per Pfadplanungsstrategie
☐ Sonstiges

Bitte geben Sie hier Ihren Kommentar ein.:

* 4a) Wie wichtig ist Ihnen das Schema, das hinter dem Rasenmähen steckt?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ sehr wichtig
- ☐ wichtig
- ☐ egal
- ☐ wenig wichtig
- ☐ nicht wichtig

* 5) Welche Energieform bevorzugen Sie für einen Rasenmäher-Roboter?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☐ nicht erneuerbar, wie z.B. Gas oder Benzin
- ☒ erneuerbar, wie z.B. Solarenergie
- ☐ Sonstige

Bitte geben Sie hier Ihren Kommentar ein.:

* 5a) Wie wichtig ist Ihnen die Form der Antriebsenergie?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ sehr wichtig
- ☐ wichtig
- ☐ egal
- ☐ wenig wichtig
- ☐ nicht wichtig

* 6) Die Grundidee eines Geographischen Informationssystems für Rasenmäher-Roboter ist eine autonome und intelligente Navigation zu gewährleisten. Daher müssen die Roboter-Koordinaten bekannt sein.

Welche geometrische Lagegenauigkeit sollte dieses System Ihrer Meinung nach aufweisen?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ < 1 mm
- ☐ < 1 cm
- ☐ < 1 dm
- ☐ 1 - 5 dm
- ☐ 5 - 10 dm
- ☐ > 10 dm

* 6a) Wie wichtig erscheint Ihnen die geometrische Lagegenauigkeit eines Geographischen Informationssystems für Rasenmäher-Roboter?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ sehr wichtig
- ☐ wichtig
- ☐ egal
- ☐ wenig wichtig
- ☐ nicht wichtig

* 7) Sind Ihnen Globale Navigations Satellitensysteme (GNSS), wie z.B. GPS oder GLONASS bekannt?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ ja
- ☐ nein

* 7a) Wie schätzen Sie die Genauigkeit folgender Systeme zur absoluten Positionierung von Rasenmäher-Robotern ein?

	angemessen	ausreichend	zu ungenau	kann ich nicht beurteilen
GNSS	☐	☐	☒	☐
dGNSS (differentielles GNSS)	☒	☐	☐	☐
RTK-GNSS (Real-Time Kinematic)	☒	☐	☐	☐

* 8) Zur absoluten Positionierung können auch digitalisierte, großmaßstäbige Karten (z.B. M 1:1.000, Katasterkarte) herangezogen werden. Wie schätzen Sie die Genauigkeit dieser Datenquelle ein?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

☐ angemessen ☐ ausreichend ☒ zu ungenau ☐ kann ich nicht beurteilen

* 9) Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der absoluten Position bieten Daten auf Basis terrestrischer Vermessungen, z.B. mit digitalem Theodoliten, bzw. mit einer Totalstation.

Wie schätzen Sie die Genauigkeit dieser Variante ein?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

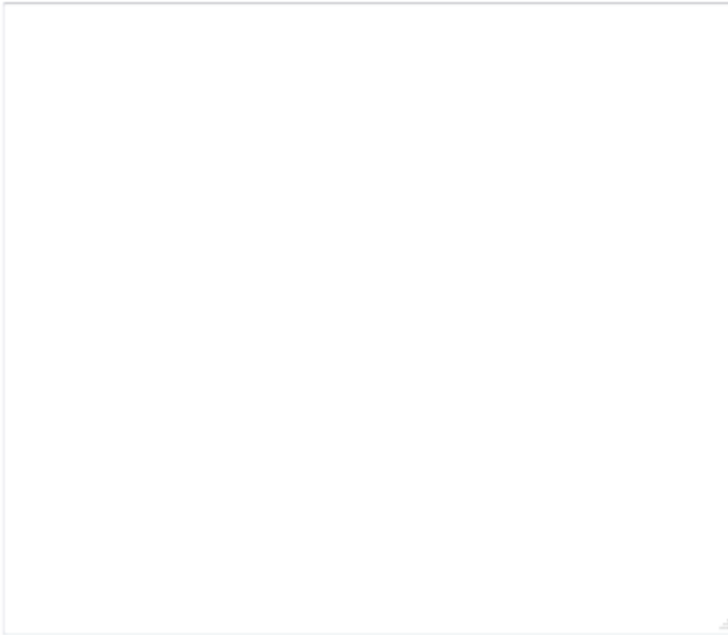
☒ angemessen ☐ ausreichend ☐ zu ungenau ☐ kann ich nicht beurteilen

* 10) Welche der genannten Methode würden Sie bevorzugen? Bedenken Sie dabei den Kosten-Nutzen-Aspekt.

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

☒ GNSS
☐ Digitalisierte Karten
☐ Terrestrische Vermessung mittels Theodolit

11) Gibt es eventuell eine andere Methode, die Sie zur absoluten Positionierung verwenden würden?

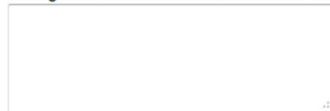


* 12) Zur Bestimmung der relativen Position kann eine Inertiale Messeinheit (en. IMU) verwendet werden. Wie bewerten Sie einen möglichen Einsatz einer IMU zur automatisierten Navigation von Rasenmäher-Roboter?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ sinnvoll
☐ nicht sinnvoll
☐ kann ich nicht beurteilen

Bitte geben Sie hier Ihren Kommentar ein.:



* 13) Ist Ihnen der Begriff SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) geläufig?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ ja
☐ nein

* 13a) Für wie sinnvoll erachten Sie den Einsatz von SLAM-Technologien in Bezug auf Rasenmäher-Roboter?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ sehr sinnvoll ☐ sinnvoll ☐ wenig sinnvoll ☐ nicht sinnvoll ☐ kann ich nicht beurteilen

* 14) Unter der Annahme, dass die Begrenzung mittels Induktionsschleife ausgeschlossen ist, welche Methode erscheint Ihnen am geeignetsten um die zu mähende Fläche zu begrenzen?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ Begrenzung mittels koordinativ bekannter Punkte
☐ Begrenzung mittels optischer Linien
☐ Andere Methode

Bitte geben Sie hier Ihren Kommentar ein.:



15) Wie effizient schätzen Sie die Navigation mittels vordefinierten Wegpunkten, in Bezug auf Rasenmäher-Roboter, ein?
Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

☒ sehr effizient
 ☐ effizient
 ☐ ausreichend
 ☐ wenig effizient
 ☐ nicht effizient
 ☐ kann ich nicht beurteilen

16) Wie effizient schätzen Sie die Methode der Koppelnavigation, in Bezug auf Rasenmäher-Roboter, ein?
Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

☒ sehr effizient
 ☐ effizient
 ☐ ausreichend
 ☐ wenig effizient
 ☐ nicht effizient
 ☐ kann ich nicht beurteilen

17) Es ist möglich dem Rasenmäher-Roboter einen Pfad über ein Graphical User Interface (GUI) vorzudefinieren. Würden Sie ein solches System empfehlen, bzw. kaufen?
Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

☒ ja
 ☐ nur unter Umständen
 ☐ nein

Bitte geben Sie hier Ihren Kommentar ein.:

18) Innerhalb der zu mähenden Fläche können statische Objekte (z.B. Sträucher, Blumenbeete, usw.) vorhanden sein. Welche Methode zur Objektdetektion würden Sie bevorzugen?
Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

☒ Objekterkennung über vordefinierte Grenzziehung um das Objekt herum
 ☐ Dynamische Objekterkennung mittels Sensoren
 ☐ Andere

Bitte geben Sie hier Ihren Kommentar ein.:

19) Zur Objekterkennung mittels Sensoren gibt es unterschiedliche Methoden. Wie effizient bewerten Sie folgende Methoden und Technologien?

	sehr effizient	effizient	ausreichend	wenig effizient	nicht effizient	kann ich nicht beurteilen
Laserscanmethoden	☒	☐	☐	☐	☐	☐
Ultraschallmethoden	☐	☐	☒	☐	☐	☐
Infrarotmethoden	☐	☐	☒	☐	☐	☐
Visuelle Systeme	☐	☒	☐	☐	☐	☐
Berührungssensoren	☐	☒	☐	☐	☐	☐

20) Moderne Rasenmäher-Roboter integrieren mehrere Sensoren- und Messsysteme. Dies schlägt sich auf den Verkaufspreis nieder. Wie viel Geld würden Sie für ein entsprechendes Modell ausgeben?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☐ < 1.000 €
 ☒ 1.000 - 2.500 €
 ☐ 2.500 - 5.000 €
 ☐ 5.000 - 10.000 €
 ☐ > 10.000 €

21) Was erwarten Sie von einem intelligenten Rasenmäher-Roboter?

22) Wie wichtig sind Ihnen folgende Kriterien beim Kauf eines Rasenmäher-Roboters?

	sehr wichtig	wichtig	egal	wenig wichtig	nicht wichtig	kann ich nicht beurteilen
Positionsgenauigkeit	☒	☐	☐	☐	☐	☐
Form der Antriebsenergie	☒	☐	☐	☐	☐	☐
Genauigkeit der Objekterkennung	☒	☐	☐	☐	☐	☐
Bedienbarkeit	☒	☐	☐	☐	☐	☐
Mähgenauigkeit	☒	☐	☐	☐	☐	☐
Selbstständige Arbeitsweise	☒	☐	☐	☐	☐	☐

23) Sind Sie der Meinung, dass in absehbarer Zukunft Rasenmäher, inkl. GNSS und intelligenter Objekterkennung und Pfadplanungsstrategien Marktreife erlangen können?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ ja
 ☐ nein

24 a) Gibt es Kundenwünsche bzw. Anregungen bezüglich intelligenter Rasenmäher-Roboter?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☒ ja
 ☐ nein

25a) Könnten Sie diese bitte genauer ausführen?

Umfrage verlassen und löschen

Später Fortfahren

<< Zurück

Weiter >>



Automatisierte Kleinraumnavigation innerhalb eines autonomen, lokalen Systems

0% 100%

Deutsch (Du-Form) ▼

Zu guter Letzt bitte ich Sie um soziodemographische Angaben.

24) In welchem Jahr wurden Sie geboren?

25) Geschlecht?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☐ männlich
- ☐ weiblich
- ☒ keine Antwort

26) Was ist ihre höchste abgeschlossene Schulbildung?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- ☐ Pflichtschule
- ☐ Lehre
- ☐ Fachschule ohne Matura
- ☐ Fachschule mit Matura
- ☐ Hochschule/Universität
- ☐ Sonstiges
- ☒ keine Antwort

Umfrage verlassen und löschen

Später Fortfahren

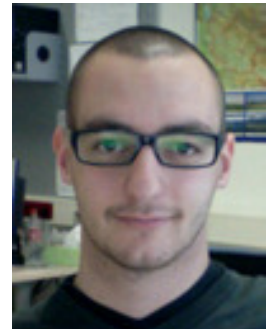
<< Zurück

Absenden

CURRICULUM VITAE

Persönliche Daten

Vor- und Zuname	Gilbert Kotzbek
Titel:	BSc
Geburtsdatum:	22.04.1987
Geburtsort:	Bruck a. d. Mur
Heimatort:	Kapfenberg
Staatsangehörigkeit:	Österreich



Ausbildung

2010/08	Inskription - Master-Studium Kartographie und Geo-Information an der Universität Wien
2010/08	Beendigung des Bachelor-Studiums mit Auszeichnung
2007/07	Inskription - Bachelor-Studium Geographie an der Universität Wien
2006/10 - 2007/04	Präsenzdienst in der Kaserne Zeltweg
2001 - 2006	HTBL Kapfenberg für Elektrotechnik, Energietechnik und industrielle Elektronik
1997 - 2001	BG/BRG Kapfenberg
1993 - 1997	Volkschule Dr. Jonas in Kapfenberg

Stipendien

2008 - 2012	Jährliches Leistungsstipendium der Universität Wien für Leistungen in den Studienjahren 2007/08, 2008/09, 2009/10, 2010/11, 2011/12
-------------	---

Fachbezogene / Berufliche Erfahrung

2012/04-12	Wissenschaftlicher Projektmitarbeiter am Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien
Seit WS2010	Mitglied der HRG (Hyperglobe Research Group) des Instituts für Geographie und Regionalforschung, Fachbereich Kartographie und Geoinformation
seit WS2010	Tutor am Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien für die Lehrveranstaltungen: PS Multimediatechnologie und Geokommunikation PS Animation & 3D-Visualisierung
2010/07	Institut für Militärisches Geowesen (IMG), Praktikant

Projekterfahrung

2012	CHIS - Cultural History Information System of the Western Himalaya
2012	Exhibition KHM "Das Antlitz des Fremden"

Publikationen

KOTZBEK G., 2013: Virtual Tabo: Geocommunication for the Preservation of Cultural Heritage with the Help of Multimedia Technology. In: KRIZ K. u. W. CARTWRIGHT, M. KINBERGER (Hrsg.), 2013: Understanding Different Geographies, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, S. 193-200

Mitgliedschaften

seit 2012	Österreichische Kartographische Kommission
seit 2008	Österreichische Geographische Gesellschaft

EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit gebe ich die Versicherung ab, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Publikationen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt.

Ort, Datum

Unterschrift