

1 Einführung

Eigenständiges und vorausschauendes Handeln erfordert Intelligenz. Dieser einfach formulierte Sachverhalt stellt bei der Realisierung eines autonom agierenden Systems eines der größten Probleme dar. Ansätze für ein autarkes Agieren von Robotern sind vielfältig zu finden, jedoch sind alle jeweils auf die besonderen Einsatzfälle oder -umgebungen zugeschnitten.

Dies trifft im engeren Sinne auch auf diese Arbeit zu, da sie auf ein spezielles Feld der autonomen mobilen Systeme ausgerichtet ist: Schwerpunkt der Arbeit bilden Roboter, die in (zum Teil für den Menschen unwirtlichen) Umgebungen Aufgaben lösen, ohne in Kontakt mit einem menschlichen Operator zu treten oder treten zu können. Das Mensch-Maschine-Interface beschränkt sich hier auf die Planung des Einsatzes, die Kontrolle nach dem Einsatz und - wenn eine Kommunikation existiert - die Möglichkeit zur manuellen Einflussnahme auf das System. Für den Einsatz in solchen Umgebungen erhält der Roboter üblicherweise eine Folge von Aufgaben, die er zu realisieren hat. Die Aufgaben können sowohl grundlegende Handlungen als auch komplexe Abläufe darstellen. Der Roboter ist somit in der Lage, über eine begrenzte Zeit selbständig agieren zu können.

Szenarien, in denen Roboter keinen Kontakt zu einem Operator haben, treten in der heutigen Zeit vielfältig in Erscheinung. Prominente Beispiele sind die Mars-Roboter der NASA, Spirit und Opportunity. Durch Einsatz der Steuerungssoftware Maestro in der Bodenstation wird der Aktivitätsplan für die Roboter mit Hilfe der von der Marsoberfläche übermittelten Informationen erstellt, simuliert und anschließend zur Abarbeitung an die Rover gesendet [BNP⁺03]. Aufgrund der engen Zeitfenster zur Kommunikation werden die zu lösenden Aufgaben an jedem Marstag für die folgenden knapp 25 Stunden im Voraus bestimmt [NAS04].

Ein weiteres, weitgehend unerforschtes Einsatzgebiet für autonome Roboter sind die Meere. 71 Prozent der Erdoberfläche sind mit Wasser bedeckt, davon zählen 80 Prozent zur Tiefsee und weisen damit Tiefen von mehr als 800 Meter auf. Diese Bereiche sind zum Beispiel weniger erforscht als die Mond- oder Marsoberfläche. Die Erkundung der Tiefsee wird heutzutage meist mit ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen (ROVs, Remotely Operated Vehicles) durchgeführt. Neben dem eigentlichen Tauchroboter sind dazu ein Mutterschiff mit der nötigen Energieversorgung sowie geschultes Personal zur Bedienung des Systems erforderlich. Bei typischen Erkundungsmissionen ist der finanzielle Aufwand für die sekundären Systeme (Mutterschiff, Personal) derartig hoch, dass zunehmend nach Alternativen gesucht wird.

Einen möglichen Ausweg stellt die Entwicklung von autonomen Unterwasserfahrzeugen (AUVs, Autonomous Underwater Vehicles) dar. Neben der finanziellen Seite sind die mangelnden Kommunikationsmöglichkeiten zwischen einem Schiff und dem tieftauchenden Roboter der zweite wesentliche Grund für die verstärkten Bemühungen um die Autonomie dieser mobilen Systeme. Die schlechten Ausbreitungseigenschaften von Funkwellen im Salzwasser der Meere führten zur Entwicklung akustischer Signalübertragungsverfahren, die aber die Erfordernisse an Reichweite und zur Verfügung stehender Bandbreite für ein teleoperier-

tes System bisher nicht erfüllen können.

Auch bei Flug- und Landrobotern ist eine zumindest zeitweilige autarke Arbeitsweise ohne Funkkontakt von Interesse. Dies beschränkt sich nicht nur auf militärische Bereiche wie zum Beispiel die Spionage, auch Routineaufgaben wie die Reinigung von Gebäuden werden durch autonome Systeme realisiert, ohne dass sie von einem Operator ständig überwacht werden. Im Unterschied zu den anderen Arbeitsumgebungen besitzen erdgebundene Roboter den Vorteil, bei unerwarteten Problemen einfach die Arbeit einstellen und auf Hilfe warten zu können. Ein fliegendes oder tauchendes System muss demgegenüber stets einen Übergang in einen sicheren Zustand ausführen.

All diese Systeme benötigen Methoden, um in unerwarteten Situationen angemessen reagieren zu können. Im einfachsten Fall bedeutet dies die Unterbrechung der Arbeit, bis eine Kommunikation mit der Leitzentrale möglich ist und ein neuer Handlungsplan übermittelt wird. Das andere Ende des Spektrums wird durch Systeme markiert, die innerhalb ihrer Arbeitsumgebung vollkommen autark auf derartige Situationen reagieren und sich aus einer Analyse heraus selbständig neue Arbeitsaufgaben definieren können.

Die erwähnten Mars-Sonden besitzen eine Hindernisvermeidungsstrategie, um sich auf dem Weg zu einem Zielpunkt keinem unnötigen Risiko auszusetzen. Weitergehende autonome Fähigkeiten sind nicht vorhanden. Das hängt unmittelbar mit der Gefahr zusammen, dass eine falsch getroffene Entscheidung des autonomen Systems in einer Vielzahl von Fällen zu einem Totalverlust führen kann. Im Gegensatz dazu ist bei erdgebundenen Robotern das Risikopotential verhältnismäßig gering, sodass häufig umfangreiche autonome Fähigkeiten anzutreffen sind.

Tieftauchende autonome Unterwasserfahrzeuge befinden sich, obwohl sie in einer verglichen mit den Mars-Rovern sehr geringen Entfernung zu ihrer Leitzentrale operieren, in einer ungleich höheren Gefahr. Durch die wenigen Informationen über die Verhältnisse in der Tiefsee wie die Struktur des Meeresbodens oder vorhandene Strömungen kann keine zuverlässige Prognose über den Verlauf einer Tauchmission in diese Region abgegeben werden. Die fast völlig fehlenden Kommunikationsmöglichkeiten verhindern ein Eingreifen des Operators in Situationen, die durch das Fahrzeug selbst nicht beherrscht werden. Aus diesem Grund sind die Missionspläne und die Softwarearchitektur für explorierende oder vermessende AUVs häufig sehr einfach aufgebaut. Damit soll ein höchstmögliches Maß an Sicherheit erreicht werden.

Motivation für die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Entwicklung eines intelligenten Missionsmanagements ist das in Kooperation zwischen unterschiedlichen Partnern entstehende autonome Unterwasserfahrzeug *DeepC* für Tiefsee-Missionen, das im Gegensatz zu den bereits existierenden tauchenden Systemen über erweiterte Methoden zum selbständigen Handeln verfügt. Neben einer sich optimal an die Umweltbedingungen anpassenden Hindernisvermeidung gehört auch das intelligente Management des Missionsplanes zu diesen Fähigkeiten. Die dafür entworfenen Verfahren sind nicht auf Unterwasserfahrzeuge beschränkt. Dies wird anhand der zweiten Anwendungsplattform, des mobilen Kleinroboters *MauSI*, gezeigt.

Die erweiterten autonomen Fähigkeiten sollen in eine bestehende, ausgereifte Softwarestruktur eingebettet werden. Dies bedeutet, dass viele verfügbare Ansätze für das intelligente Missionsmanagement nicht anwendbar sind, da sie häufig eine komplexe Anpassung der

Softwarearchitektur erfordern. Darauf wird im Kapitel 2 näher eingegangen.

In den weiteren Abschnitten dieses Kapitels sollen einige für das Verständnis der Arbeit notwendige, grundlegende Begriffe definiert und ein Überblick zu dem Inhalt der folgenden Kapitel gegeben werden.

1.1 Autonome mobile Systeme - Aufgaben und Definitionen

In den vorangegangenen Ausführungen wurde der Term *autonomes mobiles System* bereits mehrfach verwendet. Unter diesem Begriff soll in der vorliegenden Arbeit Folgendes verstanden werden:

Definition 1.1 *Autonomes mobiles System (AMS)*

Ein *autonomes mobiles System* soll in einer (bekannten oder unbekannt) Umgebung komplexe Aufgaben lösen, ohne ständigen Kontakt zu einem menschlichen Operator zu haben. Das System muss dafür die Fähigkeit besitzen, bei Bedarf ihm übertragene Probleme an die aktuelle Situation anzupassen.

Im Gegensatz zu anderen Definitionen wie zum Beispiel in [Edl97] steht hier die selbständige Erfüllung von umfangreichen Handlungsabläufen im Mittelpunkt. Aufgrund der eventuell nur eingeschränkt verfügbaren Verbindung zu einem Operator muss ein derartiges System in der Lage sein, autark auf seine Umwelt reagieren zu können.

Die zu realisierenden komplexen Aufgaben müssen dem System vor Beginn der Tätigkeit übergeben werden. Eine Menge derartiger Handlungen wird häufig als Missionsplan bezeichnet.

Definition 1.2 *Missionsplan, Planelement*

Ein *Missionsplan* besteht aus einer Folge von Planelementen. Jedes Planelement stellt dabei ein komplexes Handlungsschema für ein autonomes mobiles System dar und wird auch als Manöver bezeichnet.

Der Missionsplan beinhaltet eine Sequenz komplexer Aufgaben, die nacheinander zu lösen sind. Die Menge unterschiedlicher Planelemente, der so genannte Manöverkatalog, definiert schließlich die Bandbreite an Einsatzmöglichkeiten des autonomen mobilen Systems. Dieser Katalog ist an die konkrete Umwelt des Roboters angepasst, da beispielsweise ein erdgebundenes System andere Aufgaben als ein fliegendes oder tauchendes zu erfüllen hat.

Der Missionsplan wird mit Hilfe der Missionsplanung vor dem Beginn des Einsatzes erstellt. Dabei kann die Planung sowohl von einem Operator mittels einer Planungsoberfläche oder automatisch durch geeignete Verfahren erfolgen.

Wie bereits erwähnt ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung von Verfahren zum intelligenten Missionsmanagement eines autonomen mobilen Systems. Um eine Einordnung unterschiedlicher Ansätze vornehmen zu können, sind zunächst damit zusammenhängende Begriffe zu klären.

Definition 1.3 *Missionsmanagement*

Das *Missionsmanagement* umfasst diejenigen Verfahren, die sich mit der Planung, Realisierung und Modifikation des Missionsplanes eines autonomen mobilen Systems beschäftigen.

Der Schwerpunkt der zu entwickelnden Verfahren liegt dabei auf der Modifikation des Missionsplanes während seiner Realisierung im mobilen System. Der Begriff der Umplanung ist in diesem Zusammenhang weiter gefasst als im üblichen Sprachgebrauch autonomer mobiler Systeme. Dort wird mit der Umplanung die Umgehung vorgefundener Hindernisse und auch die Neuplanung eines Weges zum gewünschten Endpunkt der Mission verstanden. Diese in der vorliegenden Arbeit als geografische Planmodifikation bezeichneten Methoden sind nachfolgend lediglich als ein Bestandteil der Missionsumplanung zu sehen.

Um eine an das zweifellos sehr gute autonome Verhalten des Menschen angelehnte Handlungsweise zu erreichen, sollen intelligente Methoden für das Missionsmanagement eingesetzt werden. Allgemein wird der Begriff *Intelligenz* als die Fähigkeit des Menschen erklärt, zu verstehen, zu lernen und sich in konkreten Situationen erfolgreich zu verhalten. Angewandt auf das Missionsmanagement des mobilen Systems kann folgende Definition vorgenommen werden.

Definition 1.4 *Intelligentes Missionsmanagement*

Das *intelligente Missionsmanagement* hat die Aufgabe, einen Roboter dazu zu befähigen, auf unerwartete oder neue Situationen mit Korrekturen des Missionsplanes zu reagieren und die Situation erfolgreich zu bewältigen. Dabei können lernfähige Verfahren eingesetzt werden, um aus dem Erlebten Rückschlüsse auf verbesserte Handlungsweisen abzuleiten.

Verfahren zur Abbildung intelligenten Verhaltens sind dem Forschungsgebiet der künstlichen Intelligenz zuzuordnen. Sie beschäftigt sich im Allgemeinen mit der Simulation kognitiver Prozesse des Menschen durch Computerprogramme.

Für intelligentes Verhalten muss ein gewisser Umfang an Wissen vorhanden sein. Da der Begriff Wissen für die weiteren Ausführungen eine wesentliche Bedeutung besitzt, soll er analog zu [Hau00] folgendermaßen definiert werden.

Definition 1.5 *Wissen*

Unter *Wissen* werden alle als wahr oder falsch angenommenen Aussagen über die repräsentierte Welt zusammengefasst.

Wissen kann damit als Verallgemeinerung der Terme Daten (Sammlung von computerverarbeitbaren Fakten) und Informationen (zweckgebundene Datensammlungen) verstanden werden. Diese Begriffsbestimmung bildet die Basis für die Abbildung und Nutzung des Wissens in einem Computerprogramm, die beide in den nachfolgenden Kapiteln eine große Rolle spielen werden.

Zu beachten ist hier, dass Wissen nicht gleichzeitig Wahrheit bedeutet. Es ist vielmehr als der Besitz von objektiv bzw. subjektiv als wahr zu klassifizierenden Erfahrungen zu sehen.

Subjektiv als wahr empfundene Informationen, die das Produkt der Wahrnehmung sind, müssen nicht zwangsläufig als objektiv wahr akzeptiert werden. Bereits Platon sprach in seinem Dialog Theaitetos von der „Wahrheit“ des Protagoras, die sich in Endkonsequenz lediglich als Wahrnehmung oder „wahre Überzeugung“ herausstellte.

Für ein autonomes mobiles System bedeutet diese Feststellung, dass das durch Sensorinformationen entstehende Abbild der realen Welt niemals eine wahrhaftige Widerspiegelung dessen ist. Das Abbild sollte vielmehr als *wahrscheinlicher Zustand* der Umwelt betrachtet werden. Infolgedessen sind die zu entwerfenden Verfahren eher darauf ausgerichtet, einen sicheren Systemzustand zu erhalten oder zu erreichen, als mit Hilfe von Wahrgenommenem alle erdenklichen Möglichkeiten in einer Situation auszunutzen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in folgende Abschnitte. *Kapitel 2* stellt den Einstieg in die Thematik dar. Zu Beginn soll der Versuch unternommen werden, eine Einordnung unterschiedlicher Ansätze für das Missionsmanagement autonomer Systeme in die entsprechenden Wissenschaftsdisziplinen vorzunehmen. Beispiele für den Einsatz dieser Methoden runden diesen Teil ab. Die eingesetzte Softwarearchitektur und die sich daraus ergebenden Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen spielen für die Auswahl der anwendbaren Verfahren eine große Rolle. Aus diesem Grund wird in einem eigenen Abschnitt näher auf typische hierarchische Strukturen und ihre Rückführung auf ein Handlungsmodell des Menschen eingegangen. Die konkreten Rahmenbedingungen für das intelligente Missionsmanagement, die für die vorliegende Arbeit gelten, sowie die daraus resultierenden Zielstellungen beschließen diesen Abschnitt.

Das neuartige Konzept des intelligenten Missionsmanagements für autonome mobile Systeme wird in *Kapitel 3* vorgestellt. Dabei wird auf die benötigten Verfahren und die zu entwickelnden Teilmodule eingegangen. Auch Aspekte der Programmierung, die durch den gewählten Ansatz zu beachten sind, finden Berücksichtigung in diesem Kapitel.

Die Grundlagen für den Entwurf der Missionsplanung sind im *Kapitel 4* zu finden. Dabei bilden die Analyse der Planungsaufgabe sowie die Gestaltung der Bedienoberfläche wesentliche Schwerpunkte. Zwei unterschiedliche Konzepte für die Generierung von Missionsplänen, die struktur- und die geometriebasierte Planung, werden anhand von entsprechenden Darstellungen präsentiert.

Kapitel 5 gibt einen detaillierten Einblick in die wissensbasierte Überwachung der Missionsdurchführung des autonomen mobilen Systems, der intelligenten Komponente des Missionsmanagements. Dabei werden die verwendeten Methoden wissensbasierter Systeme sowie Aufbau und Inhalt der Wissensbasis vorgestellt. Besonderes Augenmerk liegt auf der Erweiterbarkeit des Systems mit neuen Regeln - auch mit Hilfe automatischer Lernverfahren - sowie der Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Einsatzszenarien.

In *Kapitel 6* werden die Verfahren zur Adaption von Missionsplänen beschrieben. Nach der Erörterung der allgemeinen Zusammenhänge, die bei der Planmodifikation zu beachten sind, werden die grundlegenden Umplanungsbefehle präsentiert. Darauf folgt die Darstellung der Optimierung eines Missionsplanes unter beschränkten Ressourcen und der geografischen Planmodifikation als Schwerpunkte dieses Abschnitts.

Die konkrete Implementierung des intelligenten Missionsmanagements für die Prototypen *DeepC* und *MauSI* wird im *Kapitel 7* diskutiert. Nach der Vorstellung der Systeme sowie der Software- und Missionsplanstrukturen sind Anmerkungen zur Realisierung des Missionsmanagements und Testergebnisse unterschiedlicher Umplanungssituationen zu finden.

Kapitel 8 bildet schließlich den Abschluss der Arbeit und wertet die gefundene Lösung des Problems. Auf weitere Problemstellungen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr untersucht werden konnten, wird ebenfalls hingewiesen.

Jedes dieser Kapitel wird von einem eigenen Rahmen zur Einführung und Zusammenfassung der wesentlichen Gedanken umschlossen. Damit soll eine Erleichterung des Zugangs zu der entsprechenden Thematik für den Leser erreicht werden.

2 Stand der Technik und Ziele der Arbeit

In diesem Kapitel wird zu Beginn ein Überblick zu bekannten Ansätzen für ein intelligentes Missionsmanagement gegeben. Dazu gehört die Einordnung der unterschiedlichen Methoden in die entsprechenden Wissenschaftsgebiete sowie die Diskussion typischer Vertreter. Daran schließen sich die Vorstellung von Softwarearchitekturen für autonome mobile Systeme sowie die Darlegung der konkreten Rahmenbedingungen und der sich daraus ergebenden neuartigen Ziele der vorliegenden Arbeit an.

2.1 Einordnung bekannter Ansätze zum Missionsmanagement

2.1.1 Übersicht

Entsprechend der Definition 1.1 müssen autonome mobile Systeme Eigenschaften intelligenten Verhaltens aufweisen, um selbständig in einer realen Umgebung Aufgaben erfüllen zu können. Die Grundlagen für intelligentes Verhalten von Maschinen wurden, wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, mit der Wissenschaftsdisziplin der künstlichen Intelligenz (KI) geschaffen.

Ein bekanntes Denkmodell und dabei gleichzeitig ein klassischer Prüfstein für künstliches intelligentes Verhalten ist der so genannte Turing-Test [Tur95]. Inhalt des Tests ist ein Vergleich der Fähigkeiten von Mensch und Maschine durch einen menschlichen Richter. Der Richter steht über ein Terminal mit beiden Kontrahenten in Kontakt und soll anhand der geführten Dialoge entscheiden, welcher der Kommunikationspartner der Rechner ist. Inhalt und Ablauf des Dialoges sind dabei im Voraus nicht bekannt. Ist der Richter nicht imstande, eine Entscheidung zu treffen, oder entscheidet er sich falsch, kann der Computer (genauer das eingesetzte Computerprogramm) als intelligent bezeichnet werden.

In den 60er und 70er Jahren standen intelligente Maschinen im Mittelpunkt vielfältiger Forschungsaktivitäten. Getrieben von ersten vielversprechenden Ergebnissen kannte die Hochstimmung zu dieser Zeit keine Grenzen, sodass mutige Zukunftsvisionen eine vollständige Nachbildung des Menschen versprachen. Im so genannten Gordon-Helmer-Report wurden Anfang der 60er Jahre durch die amerikanische Denkfabrik RAND (Research and Development) Prognosen für die Entwicklung der Wissenschaft innerhalb der nächsten 50 Jahre entwickelt [Hel66]. Eine Befragung führender Forscher lieferte die Basis der getroffenen Aussagen. Danach sollten unter anderem bis 1995 eine vollautomatische Fremdsprachenübersetzung mit korrekter Grammatik und Roboter im Haushalt und zur Müllbeseitigung verfügbar sein. Viele der im Bericht vorgestellten Prognosen sind eingetreten, wenn auch nicht immer zum richtigen Zeitpunkt. Gerade die Vorhersagen zur künstlichen Intelligenz sind jedoch - auch durch die Euphorie der Anfangsjahre - weit von der heutigen Realität entfernt. Die Idee einer selbständig denkenden Maschine, die den Turing-Test bestehen könnte, wich der Nutzung der entwickelten Methoden für praktikable Anwendungen. Heutzutage sind intelligente Systeme vielfältig anzutreffen, dabei aber stets auf ein eng umrissenes Aufgabengebiet