

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Zielsetzung und Motivation

Die vorliegende Arbeit bespricht die erfolgreiche Anwendung von Lernmethoden zur Optimierung des Verhaltens von autonomen, mobilen Robotern, die ich im Rahmen meiner Forschung bei dem RoboCup Small-Size-Team der Freien Universität Berlin, den FU-Fighters<sup>1</sup>, entwickelt habe.

Das Spektrum dieser Dissertation ist breit gefächert. Sie zeigt, dass das Lernen bei realen mobilen Robotern nicht nur möglich ist, sondern erfolgreich eingesetzt werden kann. Anhand mehrerer Beispiele wird demonstriert, wie das Verhalten der Roboter auf unterschiedlichen Ebenen verbessert werden kann. Die Lernmethoden ersetzen eine Reihe von manuellen und mühsamen Arbeiten, wie zum Beispiel die Parameteranpassung für den Regelkreis des Roboters (Kapitel 9), und lösen Probleme, die mit konventionellen Mitteln sehr schwer oder gar nicht zu bewältigen sind, wie beispielsweise das Fahren des Roboters mit ausgefallenen Motoren (Kapitel 8).

Der Zweck aller Lernverfahren ist das Verhalten des Roboters und damit das des Roboter-Teams als Ganzes zu verbessern, zu stabilisieren und robuster gegenüber Fehlern und Veränderungen der Umwelt zu machen. Dazu werden die einzelnen Methoden in ausgewählte Verhalten des Gesamtsystems eingebaut. Der Übergang von einem statischen Verhaltenssystem zu einem lernenden System ist dadurch fließend. Das System der FU-Fighters ist modular aufgebaut (siehe Kapitel 4). Dies erleichtert die Integration von Lernalgorithmen und ermöglicht eine unmittelbar messbare Leistungsbewertung. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze sind nur ein Ausschnitt aus den Bereichen, in denen Lernen eingesetzt werden kann. Die Beispiele sind so gewählt, dass das Hauptziel der Arbeit sichtbar wird: Zu zeigen, dass Lernen überall einsetzbar und überaus

---

<sup>1</sup>[www.fu-fighters.de](http://www.fu-fighters.de)

sinnvoll ist. Die hier vorgestellten, allgemein gültigen Verfahren ermöglichen es, die Lernmethoden auf andere Gebiete der Robotik leicht zu übertragen.

In dieser Arbeit geht es nicht um die Frage, was Lernen ist oder wie Menschen und Tiere lernen. Es geht auch nicht um die Frage, was Intelligenz ist, oder wie sie entsteht. Die hier vorgestellten Methoden haben auch nicht den Anspruch das Lernen in biologischen Systemen nachzuahmen. Es geht hier allein um die praktische Anwendung von Lernverfahren.

## 1.2 Industrie- und Dienstleistungs-Roboter

Roboter werden heutzutage in zwei Gruppen unterteilen: Die erste produziert industrielle Roboter, die hoch präzise und komplizierte Aktionen durchführen. Sie werden aber komplett von Menschen vorprogrammiert und von ihnen wird nur erwartet, dass sie denselben Bewegungsablauf fehlerfrei und hoch genau millionenmal durchführen. Diese Roboter intelligent zu nennen ist nicht angebracht. Keiner bezweifelt jedoch die Nützlichkeit dieser Roboter in der Massenproduktion.

Denken wir an Roboter für Fertigungsstraßen in der Automobilindustrie, dann werden oft sogar für neue Modelle neue Fabriken gebaut, da eine Anpassung bestehender Strukturen zu kostenintensiv wäre. Es ist also wünschenswert, universelle Roboter zu entwickeln, die sich leicht an eine neue Umgebung anpassen lassen.

Die zweite Gruppe sind Roboter, deren Einsatzgebiet nicht die industrielle Produktion ist. Sie versuchen eine oder mehrere menschliche Eigenschaften nachzuahmen, wie beispielsweise laufen, sehen, sprechen oder eben Fußball spielen. Ob dies intelligent genannt werden darf, soll hier nicht diskutiert werden, aber selbst die Forscher staunen manchmal über ihr intelligent wirkendes Verhalten. Sie sind die Vorboten der Künstlichen Intelligenz.

## 1.3 Robotik als Schwerpunkt der KI

Murphy unterteilt die Künstliche Intelligenz in 7 Teilgebiete [[Murphy, 2000](#)]: (1) Wissensrepräsentation, (2) Verstehen natürlicher Sprache, (3) Lernen, (4) Planen und Problemlösen, (5) Inferenz, (6) Suchen und (7) Sehen.

Die Robotik erfordert die Kombination vieler dieser Teilgebiete. Die Wahrnehmung der Umwelt muss repräsentiert und ausgewertet werden. Die Roboter müssen mit ihrer Umwelt interagieren und dafür an erster Stelle ihre Aktionen planen und ausführen. Das Sehen ist auch ein fester Bestandteil der Roboter und für sehr viele Roboter der wichtigste oder gar einzige Sensor, mit dem sie die Umwelt erfassen. Das Verstehen natürlicher Sprache wird im RoboCup noch

nicht vorausgesetzt, auf diesem Gebiet wird aber in der Robotik schon viel gearbeitet [Steels, 1999]. Das Lernen wird in der Robotik auch auf vielen Gebieten eingesetzt. Speziell beim RoboCup ist es in der Simulationsliga weit verbreitet, aber auch in anderen Ligen gibt es Ansätze. Nicht zuletzt ist es das Thema dieser Arbeit.

Eine weitere Motivation zur Verbindung von Robotik und KI kommt von Brooks [Brooks, 1991]: „[...] we identified situatedness, embodiment, intelligence, and emergence, with a set of key ideas that have lead to a new style of Artificial Intelligence research which we are calling behaviour-based robots.“ Damit hat er den Anfang der verhaltensbasierten Robotik gelegt, die folgende Eigenschaften besitzt:

1. Situatedness: Die Welt wird nicht durch ein Modell ersetzt. Die Welt selbst ist ihre beste Repräsentation. Der Roboter soll sich in der natürlichen Umwelt der Menschen befinden und die Welt so erfassen, wie sie ist.
2. Embodiment: Der Roboter soll einen Körper haben, mit Sensoren und Aktuatoren. Er soll seine Umwelt aktiv betrachten und beeinflussen können.
3. Intelligence: Der Roboter soll mit seiner Umwelt interagieren, und zwar in der Weise, die seinen Zielen oder Aufgaben entspricht.
4. Emergence: Die Intelligenz des Roboters geht aus seinen Aktionen hervor, zusammen mit der aktuellen Situation und der Umwelt.

Zum Prinzip der Forschung in der KI erklärt Brooks, dass vor allem autonome, in sich geschlossene mobile Systeme betrachtet werden sollen, mit anderen Worten: Roboter, die in unserer Umwelt leben und uns dadurch ähneln. Sie sollen sich gegenüber dem Reinigungspersonal oder Besuchern entsprechend verhalten. Sie sollen robust gegenüber sich ändernden Lichtverhältnissen sein und — falls überhaupt nötig — soll eine Rekalibrierung vollkommen autonom geschehen. Die Roboter sollen in der natürlichen Umwelt der Menschen existieren und die Welt, zum Beispiel das Labor, soll ihnen nicht angepasst werden. Die Roboter sollen sich in derselben Zeitskala wie die menschliche bewegen und interagieren, das heißt etwas weder besonders schnell noch besonders langsam machen.

## 1.4 Robotik heute

Die Robotik steckt immer noch in ihren Kinderschuhen, auch wenn schon lange auf diesem Gebiet geforscht wird [Raibert, 1986]. Doch die Rechenleistung moderner Computer kann in den nächsten Jahren den Durchbruch auf dem

Weg zu intelligenten Robotern bringen [Moravec, 2003]. „Roboter von heute sind etwa auf dem gleichen Stand, wie der Homebrew-Computer der 70er für die PCs“, wird Rodney Brooks in [Bonnert, 2004] zitiert. Nach Computern, Funktelefonen, Notebooks und PDAs kommen die Unterhaltungsroboter in jeglicher Form. Ob Haushaltsroboter zum Staubsaugen, wie der Roomba für \$149.99 der Firma iRobot<sup>2</sup> (siehe Abbildung 1.1), Spielzeugroboter wie Robosapien<sup>3</sup> für \$89,99, der auch leicht für wissenschaftliche Zwecke umgebaut werden kann [Behnke, 2004], oder Roboterbausätze, wie LEGO MindStorms<sup>4</sup> oder Fischertechnik<sup>5</sup>. Unzählige Webseiten beschäftigen sich mit Eigenbau-Robotern und Büchern über Roboter<sup>6</sup>.



Abbildung 1.1: Der Roomba Red der Firma iRobot für \$149,99. Ein absoluter Verkaufsschlager in den USA. Bearbeitetes Bild von der iRobot Webseite.

Auf der anderen Seite steht natürlich die Robotik-Forschung an vielen Instituten, Forschungslabors und Universitäten der Welt. Die Projekte umfassen alles denkbare auf dem Gebiet der Robotik. Der Roboter Kismet<sup>7</sup> vom MIT, der nur aus einem Kopf besteht, kann ein nahezu „normales“ Gespräch mit Menschen führen, in dem er den Augen seines Gesprächspartners folgt, auf Gefühle und Gesichtsausdrücke reagiert und selbst Gefühle zeigt [Breazeal, 1998, Breazeal, 1999]. Die NASA entwickelt unterschiedlichste automatisierte Sonden für ihre Missionen, die in unvorhergesehenen oder wichtigen Situationen selbstständig handeln können.<sup>8</sup> Andere Forschungsgruppen

<sup>2</sup>Die Firma ([www.irobotstore.com](http://www.irobotstore.com)) stellt Militärroboter, Forschungsroboter, Schwarmroboter und Spielzeugroboter her.

<sup>3</sup>[www.robosapienonline.com](http://www.robosapienonline.com)

<sup>4</sup>[mindstorms.lego.com](http://mindstorms.lego.com)

<sup>5</sup>[www.fischertechnik.de](http://www.fischertechnik.de)

<sup>6</sup>Zum Beispiel [www.robotbooks.com](http://www.robotbooks.com)

<sup>7</sup>[www.ai.mit.edu/projects/humanoid-robotics-group/kismet/kismet.html](http://www.ai.mit.edu/projects/humanoid-robotics-group/kismet/kismet.html)

<sup>8</sup>[www.jpl.nasa.gov](http://www.jpl.nasa.gov)

bauen durch die Biologie inspirierte Marsroboter, die möglichst preiswert sein sollen [Thakoor, 2004]. Medizinforscher aus aller Welt arbeiten an Robotern, die Operationen unterstützen oder gar selbstständig durchführen können.<sup>9</sup>

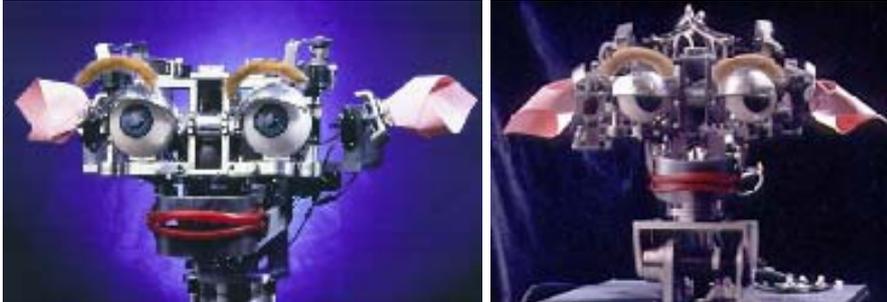


Abbildung 1.2: Der „fühlende“ Roboter Kismet von Cynthia Breazeal des MIT Forschungslabor. Links überrascht, rechts beleidigt. (Bild von Kismet Webseite)

Die Roboterindustrie ist ein sehr bedeutender Wachstumsmarkt, mit einer Wachstumsrate von 19% in 2003 und 18% in 2004. Zwischen 2004 und 2007 sollen schätzungsweise 6.6 Millionen „persönliche“ Roboter verkauft werden [UNECE, 2004]. Auf diesem Gebiet zu forschen heißt also, die Zukunft mitzugestalten.

## 1.5 Überblick

Im nächsten Kapitel wird kurz RoboCup, seine Ligen und deren Forschungsschwerpunkte vorgestellt. RoboCup ist eine Weltmeisterschaft für fußballspielende Roboter. Jedes Jahr nehmen hunderte Teams aus der ganzen Welt beim RoboCup teil, um ihre neuesten Entwicklungen und Ergebnisse zu zeigen und diese mit den anderen Teams in einem fairen Spiel unter Beweis zu stellen. Es existieren mehrere Ligen für verschiedene Bauarten von Robotern, die unterschiedlichste Aufgaben bewältigen müssen. RoboCup ist eine ideale Testplattform für eine ganze Reihe von wissenschaftlichen Bereichen: Von Mechanik und Mechatronik bis zur Künstlichen Intelligenz und Bildverarbeitung.

Anschließend werden in Kapitel 3 die Ergebnisse anderer Forscher auf dem Gebiet lernender Roboter vorgestellt. Es wird auch auf die unterschiedlichen Lernansätze in den RoboCup-Ligen eingegangen. Unterschiedliche Lernverfahren, wie Verstärkungslernen und generische Algorithmen werden kurz vorgestellt.

Bisher gab es noch keine ausführliche Beschreibung des Gesamtsystems der FU-

<sup>9</sup>[www.curac.org](http://www.curac.org)

Fighters. In Kapitel 4 wird deshalb die Software und Hardware der FU-Fighters vorgestellt, die zum grundsätzlichen Verständnis der nachfolgenden Kapitel hilfreich ist. Es wird besonders auf das Verhaltenssystem und die Bildverarbeitung eingegangen, denn sie beeinflussen stark die hier diskutierten Lernmethoden.

In Kapitel 5 wird beschrieben, wie eine Vorhersage zukünftiger Roboterpositionen und Orientierungen gelernt werden kann. Für die Prognose werden neben den aktuellen und vergangenen Bewegungszuständen auch die vergangenen Fahrbefehle für den Roboter berücksichtigt. Es werden unterschiedliche Vorhersagemethoden miteinander verglichen. Durch die Messung der Bildverarbeitungsgenauigkeit wird eine obere Schranke für die Vorhersagegenauigkeit berechnet. In diesem Kapitel wird außerdem das Delay des Gesamtsystems geschätzt, um eine geeignete Vorhersagezeit zu ermitteln.

Eine Anwendung der gelernten Roboterdynamik wird in Kapitel 6 vorgestellt. Die Bewegung des Roboters wird gelernt und in einem Simulator als Modell des Roboters benutzt.

Anschließend wird in Kapitel 7 der Zusammenhang zwischen gesendeten Fahrbefehlen und der vollzogenen Fahrausführung gelernt. Dadurch können die Fahrbefehle korrigiert werden, um die Fahrweise des Roboters zu optimieren.

Wenn Hardwaredefekte auftreten, zum Beispiel Motoren ausfallen, ändert sich das Verhalten des Roboters. Um auf das veränderte Verhalten optimal zu reagieren, muss der Fehler erkannt und kompensiert werden. In Kapitel 8 wird die Dynamik des Roboters unter verschiedenen Konditionen gelernt und für einen optimalen Ausgleich genutzt.

Im folgenden Kapitel 9 werden die Parameter der Regelkreise auf dem Roboter gelernt. Dadurch wird eine ideale Beschleunigung des Roboters erreicht und er wird in die Lage versetzt, kleine Fehler der Bewegung selbst auszugleichen.

Eine bestmögliche Bremsfunktion wird in Kapitel 9 gelernt. Die Bremsfunktion des Roboters dient dem perfekten Anhalten des Roboters, sodass er einerseits nicht über die Zielposition hinausfährt und andererseits nicht zu langsam an das Ziel heranhfährt.

Auf Seite 149 folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.