

Fachgebiet Intellektik

Es ist das Ziel der Intellektik, das Rätsel intelligenten Handelns zu entschlüsseln und Systeme zu bauen, die sich in einer Weise intelligent verhalten, wie sie beim Menschen beobachtet werden kann. Es handelt sich um eine sehr junge, gut vierzig Jahre alte Disziplin, deren Wurzeln allerdings bis in die Anfänge wissenschaftlichen Denkens zurückreichen. Mit ihrem komputationalen – dh. auf formalen Rechnungen basierenden – Ansatz hebt sich die Intellektik jedoch so deutlich von diesen Wurzeln ab, daß sie sich mit Fug und Recht als eigenständige neue Wissenschaft etabliert hat.

Nicht zuletzt wegen der angedeuteten Verflechtungen mit anderen Wissenschaften wie der Informatik, Philosophie, Psychologie, Neurologie, Linguistik ist die Positionierung, ja selbst die Namensgebung der Intellektik bis heute nicht abgeschlossen. Als synonyme Bezeichnungen sind im deutschen Sprachraum Künstliche Intelligenz, KI, Artificial Intelligence, AI und Kognitionswissenschaft(en) geläufig, die im Verständnis einzelner Autoren manchmal auch nur Teile der Intellektik bezeichnen sollen. So sehen zB. manche Informatiker die Intellektik unter der Bezeichnung KI gerne als eines ihrer Anwendungsgebiete an, eine Sichtweise, die der umfassenden Zielsetzung der Intellektik jedoch in keiner Weise gerecht wird.

Wissenschaften pflegen gerne eine Art “Drosophila”, um ihre Methoden zum Erkenntnisgewinn an einem zwar interessanten, aber noch nicht zu komplizierten System erproben zu können. So gibt es in der Biologie wohl kein anderes Lebewesen, das ausgiebiger erforscht wurde, wie eben die (leicht vermehrbare und nicht allzu komplexe) Fruchtfliege *Drosophila*. Die “Drosophila” der Intellektik der ersten vier Jahrzehnte war das Schachspiel.

Spiele reflektieren Aspekte der Wirklichkeit. Bei Schach ist dies in offensichtlicher Weise der Fall. Schach ist dabei viel einfacher als die Wirklichkeit, gleichwohl aber kompliziert genug, um das Interesse der Intellektiker der Anfangsjahre wecken zu können. Schon der große Computerpionier Konrad Zuse hat sich daher bereits Ende der Vierziger Jahre mit der Möglichkeit von Computerschach befaßt. Erst 1997 war es dann soweit, daß der damals amtierende Schachweltmeister Gary Kasparov von einer Schachmaschine mit dem Namen Deep Blue (realisiert auf einer 1024 Prozessor Maschine der IBM) in einem nach internationalem Reglement durchgeführten Turnier geschlagen wurde. Spätestens seit diesem Zeitpunkt ist diese “Drosophila” für die Intellektiker ausgereizt und nicht mehr ergiebig genug.

Es ist daher sicher kein Zufall, daß ausgerechnet im gleichen Jahr 1997 auf der IJCAI-97 in Nagoya, Japan, der erste Robocup der Welt stattfand. Hier handelt es sich quasi um die Weltmeisterschaft im Roboterfußball. Die IJCAI ist der alle zwei Jahre stattfindende Weltkongress für die Intellektik. Der Robocup wurde seither jährlich veranstaltet, 1998 im Parc de la Vilette unweit des Pariser Stade de France, wo zur gleichen Zeit die “echte” Fußballweltmeisterschaft ausgetragen wurde, 1999 wieder auf der IJCAI in Stockholm und im Jahr 2000 in Berlin während des Europäischen Pendantes zur IJCAI, nämlich der ECAI.

Es gibt vier Robocup-Ligen: die Simulationsliga, in der keine echten Roboter beteiligt sind, sowie die Ligen der kleinen, mittleren und AIBO Roboter. In jeder Liga wird nach üblichem Fußballreglement der jeweilige Weltmeister ermittelt. Wer einmal ein solches Roboterspiel gesehen hat, versteht, daß man sich der Faszination autonom agierender Roboter in einem solchen Spiel nicht entziehen kann. So hallte immer wieder durch die Hallen einer ehemaligen Lateinschule in Stockholm der befreiende kollektive Aufschrei der Zuschauer, wenn einer der Roboter seine Gegner ausgetrickst und ein Tor erzielt hatte, exakt genauso wie bei einem "richtigen" Fußballspiel.

Überall auf der Welt wird schon wieder fieberhaft an der Verbesserung der erforderlichen Techniken gearbeitet, um im nächsten Jahr einen der ersten Plätze im Robocup erringen zu können. Hinter dem ganzen Unternehmen steht das Fernziel, in wenigen Jahrzehnten eine Mannschaft von elf anthropomorphen (dh. menschengestaltigen) Robotern beisammen zu haben, die den amtierenden (homoiden, dh. menschlichen) Fußballweltmeister auf einem realen Fußballfeld schlägt. Wenn nicht alles täuscht, handelt es sich beim Robocup um die neue "Drosophila" der Intellektik. Die nachfolgende Beschreibung der Forschungsarbeiten am Fachgebiet Intellektik in Darmstadt soll sich daher an dieser Zielrichtung orientieren (obwohl unsere Forschungen sich nicht explizit mit dem Robocup beschäftigen), weil dieses Anwendungsbeispiel wohl jedermann anschaulich verständlich ist. Dabei wird sich auch die weite Ausdehnung der Intellektik zeigen, angesichts derer sich unsere Fachgebietsexpertise nur auf ein kleines Teilgebiet beschränken kann.

Zur erfolgreichen Realisierung eines fußballenden Roboters gehört die Beherrschung einer Fülle von Techniken, von der wir noch weit entfernt sind. Die offensichtlichsten Aufgaben bestehen in dem ingenieurmäßigen Bau eines Roboters mit menschenähnlicher Gestalt, der sich menschenähnlich bewegen und verhalten kann. Dies ist eine Aufgabe, bei der die wesentlichen Beiträge von Maschinenbau- und Elektrotechnikern kommen werden. Die Firma Sony hat bereits einen zweibeinigen Roboter mit menschenähnlicher Gestalt entwickelt, der die Balance im Stand auch auf einem Bein halten und mit dem anderen einen Ball abstoßen kann. Die Erbringung der gleichen Leistung aus dem Lauf heraus ist jedoch noch eine große Herausforderung. Die derzeitigen Robocup-Roboter sind kleine Kästen auf Rädern und nur im Fall der AIBO-Roboter von Sony dackelähnliche Vierbeiner. Zudem spielt ein menschlicher Fußballer mit dem ganzen Körper (Kopf, Brust, Schenkel usw.) und hat zudem eine Fülle von Sensoren, die ihm eine Feinsteuerung der Ballbehandlung ermöglichen. Robocup-Roboter stieren mit ihrer meist oben angebrachten Kamera im ungünstigen Fall dagegen das ganze Feld ab, ohne den Ball zu ihren Füßen entdecken zu können (wie das Herrchen seinen Dackel unterm dicken Bauch nicht wahrnehmen kann).

Selbst wenn all diese technischen Schwierigkeiten überwunden wären, bleibt noch die große Herausforderung des "Feintrainings" unter Realzeitbedingungen: die Bombe ins rechte untere Toreck aus dem vollem Lauf heraus, wobei das Bein für das Auge des Torwarts so geführt wird, als ziele es ins gegenüberliegende linke Eck. Mit konventioneller, expliziter Programmierarbeit wird derartige Raffinesse wohl nie realisierbar sein. Hier sind Metatechniken der Optimierung durch Training und Lernmechanismen unabdingbar.

Bis zu diesem Punkt haben wir den “kopflösen” Fußballroboter beschrieben, der laufen, den Ball führen und schießen kann. Ohne planmäßiges und kooperierendes Handeln entsteht jedoch kein “guter Fußball”. Keine der bisherigen Robocup-Mannschaften bietet hier mehr als rudimentärste Ansätze. Genau auf diesem Gebiet des Planens liegt eine der Expertisen unseres Fachgebiets an der TUD. Zum Planen gehört das Wissen über mögliche Handlungen: den Ball flach vor den Fuß des Mittelstürmers schießen oder hoch über die Köpfe der anderen auf den Kopf des Rechtsaußen oder hochspringen, um den Ball mit dem Kopf zu erreichen usw. usf. Dazu gehört auch das Wissen über die augenblickliche Situation (die eigene Position ebenso wie der Mitspieler, der Gegner, des Balls usw.), von der aus geplant wird, sowie über das Ziel, das mit einer Kette von Handlungen erreicht werden soll, in der Regel eben das erzielte Tor. Wie repräsentiert man derartiges Wissen in einem Computer?

Es gibt viele unterschiedliche Formalismen, mittels derer sich derartiges Wissen in einem Computer speichern läßt. Einer davon besteht aus sogenannten Produktionsregeln. Zu einer solchen Regel gehören Bedingungen, unter denen eine Handlung ausgeführt wird: zB. *wenn* sich mir der Ball nähert *und* durch meinen Aktionsradius kommen wird, *dann* bewege ich mich hin zum nächsten Punkt der Balltrajektorie und stoppe den Ball dort; *wenn* ich den Ball gestoppt habe *und* die Bahn in Richtung gegnerisches Tor frei ist, *dann* tripple ich mit dem Ball in diese Richtung; usw. Experimente der Psychologen haben ergeben, daß routinemäßiges Handeln des Menschen (wie eben auch Fußballspielen) mit Produktionsregeln sehr angemessen modelliert werden kann.

Der Einsatz einer Produktionsregel setzt die Prüfung ihrer Bedingungen voraus. Dazu gehört natürlich die Verarbeitung, insbesondere die Interpretation der Daten, die über die Sensoren (Fernsehkamera usw.) dem Roboter zur Verarbeitung bereitgestellt werden. Nehmen wir an, der Rechner habe das Nähern des Balles erkannt und seine Trajektorie (dh. Flugbahn) näherungsweise berechnet. Dann muß er nach der genannten Produktionsregel noch zusätzlich prüfen, ob die Trajektorie durch seinen Aktionsradius läuft. Hierzu muß das Wissen über diesen Aktionsradius in Abhängigkeit der verbleibenden Zeit logisch mit der erkannten Trajektorie in Bezug gesetzt werden. Mit anderen Worten, es ist auch logisches Schließen, zumindest in einer kodierten Form, erforderlich. Tatsächlich lassen sich viele der hier besprochenen Aufgabenstellungen, wie auch das bereits erwähnte Planen, auf logisches Schließen zurückführen. Wegen dieser zentralen Stellung von logischen Schlußtechniken haben wir uns in Darmstadt besonders auch auf die Entwicklung von Systemen konzentriert, die zu korrektem logischen Schließen fähig sind. Eines der von uns entwickelten Systeme heißt KOMET. Aus historischen Gründen nennt man derartige Systeme automatische Beweiser, mit denen man – neben den für’s Fußballspielen erforderlichen logischen Schlüssen – zB. auch mathematische Beweise führen kann. Mit derartigen Beweisern sind schon Beweise für mathematische Vermutungen völlig automatisch gefunden worden, die die hervorragendsten Mathematiker vorher jahrelang vergeblich gesucht hatten. Zudem liefern derartige Beweiser die einzig möglichen Werkzeuge, mit denen man die weitestgehende Korrektheit von Computerprogrammen präzise nachweisen kann. Gerade wegen dieser letztgenannten Anwendung sind Beweiser heute von größter praktischer Bedeutung.

Jetzt können wir uns also vorstellen, wie eine einzelne Produktionsregel aktiviert wird, zB. wenn der Ball vom Roboter gestoppt wird: aufgrund der Sensordaten und ggf. unter Zuhilfenahme eines Beweisers werden die Bedingungen der Regel abgeprüft und im positiven Fall die Aktion der Regel ausgeführt. Planen heißt nun aber, eine Kette von Produktionsregeln vorauszudenken, deren Aktivierung jeweils möglich ist und schließlich zum Ziel führt. Das ist schon dann eine nicht einfache Aufgabe, wenn es sich um einen einzelnen agierenden Roboter handeln würde. Er müßte im Prinzip alle denkbaren Verkettungen von Produktionsregeln durchrechnen, ob jeweils deren Bedingungen erfüllt werden können und ob eine Regel in der Kette schließlich das Ziel erreichen wird. Sowohl in unserem Fachgebiet als auch an vielen anderen Stellen der Welt sind entscheidende Verbesserungen dieses einfachsten komputationalen (dh. berechnungsmäßigen) Vorgehens entwickelt worden. Dabei sind die Techniken unabhängig von der Anwendung (wie hier zum Planen beim Fußball). Insbesondere handelt es sich um (Such-) Techniken, die in Beweisern und anderen derartigen Systemen zum Einsatz kommen, weil die Art der Regel (in unserem Beispiel Produktionsregeln) bei der Regelverkettung von untergeordneter Bedeutung für diese Techniken ist.

In unserer Anwendung handelt es sich aber um eine wesentlich kompliziertere Aufgabe, weil sich ja jeder der zweiundzwanzig autonomen Roboter jeweils auch mit den möglichen Aktionen der anderen einundzwanzig auseinandersetzen muß. Er muß sich dabei darauf verlassen können, daß der andere den Ball aufnimmt, wenn er ihm zugespielt wird. Er muß Wissen über dessen Fähigkeiten haben und dieses bei seinen Überlegungen mit einbringen. Die Mannschaft als ganzes muß ein gemeinsames Repertoire von Strategien besitzen, so daß einer aus dem Verhalten des anderen die augenblicklich verfolgte Strategie erkennen und sein Verhalten entsprechend anpassen kann. Insbesondere muß man auch mit allen denkbaren Gemeinheiten des Gegners rechnen. Wie schwierig dies alles tatsächlich ist, kann man Sonntag für Sonntag auf den Fußballfeldern der Nation studieren. Ohne Übung kein Meister, auch nicht bei den Robotern. Übung heißt hier mechanisches Lernen, eine weitere Domäne, die in der Forschung unseres Fachgebietes eine wichtige Rolle spielt.

Das so skizzierte Planen geht von diskreten Aktionen aus, während ein Fußballspiel ja ein kontinuierliches Geschehen darstellt. Die Umsetzung eines diskreten Planes in ein kontinuierliches Verhalten der einzelnen Roboter gehört auch heute noch zu den großen technischen Schwierigkeiten in der Intellektikforschung.

Auch wenn wir all dies am Beispiel des Robocup illustrieren, sollte klar sein, welch vielfältige Anwendungsmöglichkeiten gegeben wären, hätte man Teams von Robotern soweit entwickelt, daß sie planerisch und kooperierend handeln könnten: derlei Teams könnten in Fabrikanlagen, im Bergbau, unter Wasser, in verstrahlten Atomkraftwerken, aber auch bei medizinischen Operationen, im Haushalt ebenso wie im Weltraum eingesetzt werden.

Es sollte aus dieser Darstellung auch klar geworden sein, daß ein Robotersystem, das als Fußballer in der beschriebenen Weise taugt, von höchster Komplexität sein wird. Wir sind in unserem Fachgebiet davon überzeugt, daß ein solches System in herkömmlicher Programmierung kaum mehr bewältigt werden kann. Wir verfolgen daher zugleich das Ziel, das Programmierniveau auf die Ebene der Problembeschreibung (dh. Spezifikation) anzuheben. Die erwähnten Beweiser können nämlich auf eine derartige Problembeschrei-

bung angesetzt werden und einen Beweis für eine Lösung des Problems finden. Man kann die Problembeschreibung selbst als Programm auffassen, wie es in der Logikprogrammierung (zB. mittels der Programmiersprache PROLOG) geschieht. Oder man extrahiert aus einem derartigen Beweis ein herkömmliches Programm in der Programmiersprache seiner Wahl (wie zB. Java). Mittels des Beweisers ist das Programm in einem solchen Fall dann aus der Spezifikation automatisch synthetisiert worden, wie man sagt, und man nennt dieses Teilgebiet daher auch das der Programmsynthese. Bei einem solchen Vorgehen sind Programmierfehler im bisherigen Sinne nahezu ausgeschlossen, was wiederum von höchster praktischer Relevanz ist. Auch kann man derartige "Programme" leicht modifizieren, indem man einfach die Spezifikation entsprechend abändert.

Damit vor lauter Begeisterung über den Robocup die eigentliche Botschaft dieser Beschreibung nicht vergessen wird, sei nun noch einmal das spezielle Knowhow im Fachgebiet Intellektik an der TUD in den Begriffen zusammengefaßt, die anhand dieser eingängigen Beispielanwendung illustriert wurden. Wir bauen Beweiser für korrektes logisches Schließen über formal im Computer repräsentiertes Wissen und wenden diese Beweiser in mannigfacher Weise an. Dabei studieren wir einerseits Suchtechniken, aber auch unterschiedliche Formalismen zur Repräsentation des erforderlichen Wissens. Die Anwendungen reichen vom Beweisen mathematischer Sätze, über die Durchführung korrekter logischer Schlüsse, die bei der Erstellung von Plänen erforderlich sind, bis hin zum Nachweis der Korrektheit von Programmen, aber auch zur Logikprogrammierung, Programmsynthese und zu Lernverfahren. Bei all diesen Themen handelt es sich um sehr anspruchsvolle Forschungen, die nicht in einigen Jahren bereits abgeschlossen sein werden.

Unser Fachgebiet hat sich durch die auf diesen Gebieten bisher erzielten Forschungsergebnisse international einen herausragenden Namen gemacht, was sich auch an einer Reihe von Preisen zeigt, die wir bekommen haben. So ist in diesem Jahr eine Dissertation aus unserem Fachgebiet von der deutschen Gesellschaft für Informatik als die *beste deutsche Informatikdissertation des Jahres 1998* ausgezeichnet worden, um nur dieses jüngste Beispiel zu nennen.

Wolfgang Bibel