

# Fußball und Künstliche Intelligenz: Vom Denken zum Handeln

Bernhard Nebel

## 1 Einleitung

Nachdem die deutsche Nationalelf sich schließlich doch noch für die Teilnahme an der Weltmeisterschaft qualifiziert hat, ist der KI-Forschergemeinde eine große Bürde abgenommen worden. Es sind jetzt nicht mehr nur die deutschen Roboterfußballspieler, die nächstes Jahr die deutsche Fußballlehre im Land der aufgehenden Sonne verteidigen müssen.

Aber wie kommt es, dass sich ernsthafte Forscher mit einem Spiel wie Fußball auseinandersetzen? Wir wollen hier versuchen, eine Antwort auf diese Frage zu finden.

## 2 Roboterfußball: Geschichte und Motivation

Herbert Simon prophezeite in den Fünfzigern [Simon und Newell, 1958], dass Computer in kurzer Zeit intellektuelle Fähigkeiten haben würden, die denen von Menschen vergleichbar wären und dass Computer innerhalb von zehn Jahren in der Lage sein würden, den Schachweltmeister zu schlagen. Der amtierende Schachweltmeister wurde allerdings erst 1997 geschlagen, gut vierzig Jahre nach der Vorhersage.

Obwohl dieser Sieg beeindruckend war, relativiert er sich doch, wenn man andere Fähigkeiten von Computern und Robotern mit denen des Menschen vergleicht. Insbesondere haben Roboter extreme Schwierigkeiten sich in Umgebungen zurechtzufinden, die nicht extra für sie zugeschnitten wurden. Konsequenterweise steht heutzutage in der Künstlichen Intelligenz auch nicht mehr das reine Denken im Vordergrund sondern das Handeln innerhalb einer Umwelt.

Ein Initiator dieser Richtungsänderung war Rodney Brooks, der mit seinen Robotern demonstrierte, dass es *nicht* notwendig ist, die Umwelt zu rekonstruieren um in dieser Rekonstruktion deliberativ eine auszuführende Aktion auszuwählen. Im Gegenteil, er argumentierte, dass für ein erfolgreiches Überleben schnelle Reaktionen und nicht das vollständige Verständnis der Umwelt erforderlich ist. Auf einen Punkt gebracht war sein Credo der *verhaltensbasierten Robotik*, dass “Elefanten kein Schach spielen” [Brooks, 1990].

Man mag das als Aufforderung sehen, Handlungen wichtiger als das Denken zu nehmen. Auf jeden Fall ist deutlich geworden, dass man Denken nicht losgelöst von Handlungen betrachten kann. Mackworth [1993] schlug dann in diesem Sinne Roboterfußball als Domäne vor. Methoden aus der Bildverarbeitung, der Robotik, dem Schließen unter Echtzeitbedingungen und den Multi-Agenten-Systemen müssen dabei integriert werden, um zu Systemen zu gelangen, die auf dem Fußballfeld erfolgreich agieren können.

Ende der Neunziger griffen Kitano und andere [1997] diese Idee auf und schlugen vor, Roboterfußball als Testanwendung zu definieren und regelmäßig Wettbewerbe und Workshops zu diesem Thema durchzuführen. Während der IJCAI 1997 fand das erste *RoboCup*-Turnier statt, auf dem in verschiedenen Klassen autonome Agenten gegeneinander antraten. Es gab damals drei verschiedene Ligen:

- die Liga der *simulierten Spieler*, die auf einem simulierten Feld kicken;
- die *F180 Liga*, in der Roboter mit einer maximalen Grundfläche von 180 cm<sup>2</sup> auf einem Tischtennisfeld gegeneinander spielen;
- und die *F2000 Liga*, in der Roboter mit maximal 2000 cm<sup>2</sup> Grundfläche und 80 cm Höhe auf einem Feld der Größe 5×8 Meter gegeneinander antreten.

Ich kann mich noch deutlich an Spiele erinnern, bei denen keiner der Roboter dem Ball auch nur nahe kam. Auch gab es ein Spiel, das 2:2 beendet wurde, bei dem aber alle Tore von nur einem Team geschossen wurden. Das Endspiel in der F2000-Liga wurde unentschieden beendet, da den Teams am Schluss die Batterien versagten. Es gab aber in der Simulationsliga auch Spiele, die einen sehr überzeugenden Eindruck hinterließen.

Dieser erste Wettbewerb hat viele Forschungsgruppen inspiriert. Während 1997 41 Teams teilnahmen, waren es 1998 schon 62 Teams. Noch eindrucksvoller ist der Zuwachs bei der Anzahl deutscher Teams. 1997 trat nur das Team der HU Berlin an, das dann den Weltmeistertitel errang. 1998 beteiligten sich bereits 6 deutsche Teams in der Simulationsliga und 5 deutsche Teams in der F2000-Liga (siehe Tabelle 1).

Jahr	Gesamt	Simu.	F180	F2000	Legged	Rescue
1997	41 (1)	32(1)	4(0)	5(0)	–	–
1998	62(11)	34(6)	12(0)	16(5)	–	–
1999	73(14)	35(6)	18(2)	20(6)	–	–
2000	84(13)	40(7)	16(1)	16(4)	12(1)	–
2001	105(15)	44(8)	20(1)	18(5)	16(1)	7(0)

Tabelle 1: Teilnehmerzahlen bei den internationalen RoboCup-Wettbewerben (in Klammern die Anzahl deutscher Teams)

Seitdem haben die Teilnehmerzahlen kontinuierlich zugenommen. Wie man der Tabelle weiterhin entnimmt, sind auch weitere Ligen hinzugekommen. Seit 2000 gibt es die sogenannte “Sony Legged League”, in der Sonys Aibos gegeneinander antreten. Seit diesem Jahr gibt es außerdem den *RoboCup Rescue* Wettbewerb, auf den weiter unten noch eingegangen wird.

Auf der Ebene der Forschungsförderung ist anzumerken, dass in diesem Jahr ein DFG-Schwerpunktprogramm mit dem Titel *Kooperierende Teams mobiler Roboter in dynamischen Umgebungen*<sup>1</sup> eingerichtet wurde, dessen Fokus der *RoboCup* ist. Im Zusammenhang damit gibt es seit diesem Jahr auch einen jährlichen nationalen Wettbewerb mit wissenschaftlichem Programm, den *RoboCup German Open*.

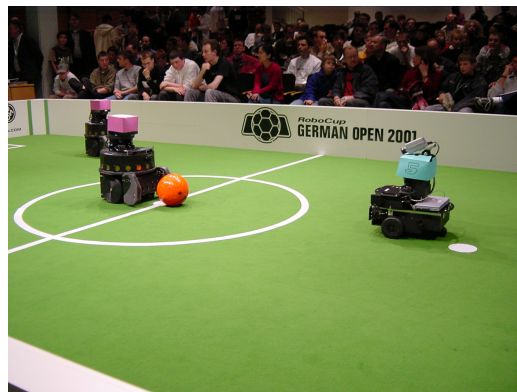


Abbildung 1: Ein Spiel bei den *German Open 2001*

---

<sup>1</sup>Siehe auch <http://ais.gmd.de/dfg-robocup/>.

### 3 Wettbewerbe in der Wissenschaft: Methodenevaluation im Kontext

Der RoboCup-Wettbewerb ist nicht der einzige internationale Wettbewerb in der KI. Es gibt zum Beispiel die Wettbewerbe zum maschinellen Theorembeweisen [Sutcliffe, 2001], zum Handlungsplanen [Bacchus, 2001] und zu Auktionsagenten [Wellman *et al.*, 2001]. Außerdem gab es mehrere Jahre lang einen Wettbewerb in der Computerlinguistik, die *Message Understanding Competition*.

Eine Motivation für all diese Wettbewerbe ist, den Fortschritt des Gebietes öffentlich zu demonstrieren. Wichtiger ist aber, den Stand der Kunst mit Hilfe der Wettbewerbe voranzubringen. Der Fortschritt in Gebieten wie der KI erfolgt zum einen durch Grundlagenforschung, bei der neue Methoden entwickelt und getestet werden. Zum anderen ist die Anwendungsforschung wichtig, da diese den in der Grundlagenforschung entwickelten Methoden dem Praxistest unterwirft. Zwischen diesen beiden Vorgehensweisen klafft allerdings eine Lücke. Meist werden die Methoden nur isoliert und nicht in einem größeren Kontext untersucht. Zudem gibt es kaum vergleichende Evaluierungen verschiedener Methoden. Diese Lücke füllen wissenschaftliche Wettbewerbe, die es ermöglichen, verschiedene wissenschaftliche Ansätze direkt zu vergleichen.

Die Vorteile solcher Wettbewerbe liegen klar auf der Hand. Durch die Konkurrenzsituation gibt es einen sehr viel stärkeren Ansporn und man erhält einen direkten Vergleich verschiedener Systeme. Die Teilnehmer sind gezwungen, sich jeweils dem gesamten Problembereich zuzuwenden und können sich nicht auf kleine, ausgewählte Beispiele zurückziehen. Man sollte aber auch die negativen Seiten nicht verschweigen. Die Suche nach neuen innovativen Lösungen kann sich in der Suche nach Löchern in den Wettbewerbsregeln erschöpfen. Auch kann die Konzentration auf die Wettbewerbsaufgaben dazu führen, dass man die wirklich wichtigen Forschungsfragen nicht mehr im Auge hat. Schließlich binden die Wettbewerbe Ressourcen in ganz erheblichem Umfang.

Im Großen und Ganzen scheint aber bei den meisten Beteiligten die Einschätzung vorzuherrschen, dass die Vorteile wissenschaftlicher Wettbewerbe dominieren. Wichtig ist allerdings, dass die Wettbewerbe in wissenschaftliche Veranstaltungen eingebunden sind, in denen auch die eingesetzten Methoden und Techniken präsentiert werden, so dass ein wissenschaftlicher Austausch und Fortschritt ermöglicht wird.

## 4 Wie spielen Roboter Fußball?

Wie bringt man nun einer Gruppe von Robotern bei, Fußball zu spielen? Der Reiz dieser Aufgabe liegt darin, dass sehr viele Fähigkeiten erforderlich sind, um gut Fußball zu spielen. Die Aktorik muss schnell genug sein und geeignet sein, mit dem Ball umzugehen. Die Sensorik muss es erlauben, den Ball zuverlässig zu erfassen, die eigene Position auf dem Spielfeld zu bestimmen und die Positionen der Mitspieler und Gegner zu schätzen. In Abbildung 2 ist beispielsweise ein Spieler unseres Teams *CS Freiburg* zu sehen, der die entsprechenden Hardware-Komponenten besitzt.<sup>2</sup>



Abbildung 2: Ein Spieler des F2000-Teams *CS Freiburg*

Als Aktorik hat jeder *CS Freiburg* Spieler zwei separat angetriebene Räder, eine Ballführungseinrichtung, die beweglich ist, und einen Kicker, der durch Federkraft angetrieben ist. Auf der Sensorikseite besitzt er eine Digitalkamera zur Erfassung des Balls, er hat einen Laserscanner zur Erkennung des Spielfeldrandes und der anderen Spieler, und er besitzt eine interne Odometrie zur Messung der abgefahrenen Strecke. Das „Gehirn“ des Spielers ist ein kleines Notebook. Andere Teams setzen zum Teil völlig andere Aktorik oder Sensorik ein. So gibt es zum Beispiel omnidirektionale Antriebe, die es erlauben, sich in jede Richtung zu

---

<sup>2</sup>Siehe auch <http://www.cs-freiburg.de>.

bewegen.

Gute Aktorik und Sensorik reichen alleine aber nicht aus. Die Aktorik muss gesteuert werden und die Sensoreingaben müssen interpretiert werden. Am wichtigsten ist es jedoch, zu bestimmen, welche Aktion als nächstes ausgeführt werden soll. Dabei kommt es zum einen auf hohe Reaktionsgeschwindigkeit an, zum anderen aber auch auf längerfristiges Denken und Abwägen, beispielsweise beim Positionsspiel. Zudem muss man mit den Sensorfehlern und -störungen umgehen können.

Dabei orientiert man sich am menschlichen Fußballspiel, obwohl viele Dinge noch außen vorbleiben, wie z.B. Kopfbälle. Man kann aber auch an vielen Stellen über das menschliche Fußballspiel hinausgehen. Im *CS Freiburg* Team wird zum Beispiel mit Hilfe der WLAN-Technik sehr intensiv zwischen den Spielern kommuniziert. Das wird unter anderem dazu genutzt, die Einzelpositionsschätzungen zu verbessern und „Halluzinationen“ einzelner Spieler zu erkennen [Dietl *et al.*, 2001].

Neben dieser *kooperativen Wahrnehmung* steht die Kooperation bei der Durchführung von Aktionen im Vordergrund. Viele Teams haben eine Rollenaufteilung, die jedem Spieler eine Rolle zuweist. Diese Rollenaufteilung kann zusätzlich auch noch dynamisch sein, wie z.B. bei dem italienischen *ART-Team* [Castelpietra *et al.*, 2001] und auch bei unserem *CS Freiburg* Team [Weigel *et al.*, 2001].

Der Einsatz dieser Techniken hat sich bei den letzten RoboCup-Wettbewerben sehr bewährt. Das *CS Freiburg* Team konnte bereits dreimal den Weltmeistertitel in der F2000-Liga erringen. Interessant ist hierbei, dass diese Erfolge auch darauf basieren, dass explizit ein Modell der Umgebung aufgebaut wird und über diesem Modell deliberiert wird. Im Gegensatz also zu den oben erwähnten Ansätzen der verhaltensbasierten Robotik setzen wir auf Denken *und* Handeln.

Ob dies wirklich die bessere Lösung ist, kann man nicht abschließend sagen. Bei dem Endspiel in der F2000-Liga dieses Jahr musste der *CS Freiburg* gegen ein verhaltensbasiertes, reaktives Team – die *Osaka Trackies* – antreten. Zwar stand unsere Verteidigung, aber die *Trackies* waren sehr viel schneller am Ball. Das entscheidende Tor fiel dann eher deshalb, weil eine rote Karte gegeben worden war, weil die *Trackies* Ausfälle zu beklagen hatten und unser Team robuster war.

Wichtiger noch als Gewinn und Niederlage beim Wettbewerb sind meiner Meinung nach die Möglichkeiten, Methoden und Techniken beim RoboCup zu entwickeln, zu evaluieren und ggfs. in anderen Anwendungen einzusetzen. Außerdem ist der Roboterfußball eine gut geeignete Umgebung um Techniken zu motivieren und im Kontext zu studieren, wie z.B. Reinforcement-Lernen [Enoki-

da *et al.*, 2001] und spieltheoretische Ansätze beim Lernen [Bowling and Veloso, 2001].

## 5 Stand der Kunst und Anwendungsperspektiven

Beim Betrachten der Spiele stellt man fest, dass wir noch sehr weit von der RoboCup-Vision entfernt sind, im Jahr 2050 den menschlichen Weltmeister im Fußball mit einem Team von Robotern zu schlagen. Allerdings sind 50 Jahre eine sehr lange Zeitspanne und wenn man sich überlegt, welche Fortschritte wir seit 1950 gesehen haben, scheint diese Vision doch im Bereich des Möglichen zu liegen.

Abgesehen von dieser langfristigen Perspektive haben sich die Fähigkeiten der Roboter-Teams seit 1997 signifikant verbessert. Dies wird deutlich, wenn man sich Videos der Spiele anschaut und objektive Leistungskriterien anlegt [Isekenmeier *et al.*, 2001]. Insbesondere die deutschen Mannschaften spielen in vielen Ligen ganz vorne mit. Die Teams der *HU Berlin*, der *Univ. Freiburg* und der *Univ. Karlsruhe* kamen in der Simulationsliga auf einen der ersten drei Plätze. In der F180-Liga hat die *FU Berlin* bereits mehrmals den 2. Platz errungen, und in der F2000-Liga haben die Teams der *Univ. Freiburg*, der *Univ. Tübingen* und der *Univ. Stuttgart* vordere Plätze belegt.

Kann man aus diesen Erfolgen auch Anwendungsperspektiven ableiten? Zum einen ist klar, dass man innerhalb des RoboCup bestehende Techniken evaluieren und weiter entwickeln kann. Zum anderen werden auch Methoden speziell für den RoboCup entwickelt, wie z.B. die oben erwähnte kooperative Objektlokalisierung, die auch in anderen Kontexten Gewinn bringend genutzt werden kann.

Anwendungsperspektiven ergeben sich dabei in allen Multi-Agenten und Multi-Robot Szenarien, wie z.B. bei dem Einsatz von Gruppen von Reinigungsrobotern [Jäger und Nebel, 2001]. Ein weitere, sehr ambitionierte Anwendungsdomäne sind Rettungsaktionen in Katastrophenszenarien. Wie beim Fußball ist auch hier die Koordination mehrerer Agenten wichtig. Allerdings hat man es mit sehr viel mehr Agenten zu tun (100–1000 statt 4–11), Logistik spielt eine viel größere Rolle und Langzeitplanung ist sehr wichtig [Kitano *et al.*, 1999]. Dieses Szenario wurde ausgebaut und hat zu zwei weiteren Wettbewerben im Rahmen des RoboCups geführt. Seit diesem Jahr gibt es die *RoboCup Rescue Simulation* und die *RoboCup Rescue Robot* Wettbewerbe. Obwohl oder vielleicht auch gerade wegen der höheren Komplexität der Aufgabe waren diese Wettbewerbe allerdings nicht die Publikumsлюбlinge beim letzten RoboCup. In der Tat war es nicht ohne wei-

teres möglich, den Wettbewerben zu folgen, da die Regeln im Gegensatz zu den Fußballregeln nicht offensichtlich waren.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Fußballspiel hat innerhalb der KI einen Stellenwert erhalten, den wohl niemand vor 5 Jahren für möglich gehalten hätte. Jährlich kommen über 100 Forschungsgruppen aus aller Welt zusammen, um ihre Lösungen in Wettbewerben zu evaluieren. Neben der Wirkung in der Öffentlichkeit führen diese Wettbewerbe auch dazu, dass neue Methoden im Gebiet der Multi-Agenten- und Multi-Robot-Systeme entwickelt werden und bekannte Methoden im Kontext evaluiert werden. Mittel- und langfristig hat der Roboterfußball ein hohes Potenzial, insbesondere auch was Anwendungen in den beschriebenen Katastrophenszenarien betrifft. Man mag sich fragen, ob die RoboCup-Vision realistisch ist, dass in fünfzig Jahren eine Robotermannschaft gegen eine menschliche Mannschaft antritt und diese besiegt. Betrachtet man jedoch die Fortschritte der letzten fünfzig Jahre, so erscheint diese Aufgabe nicht völlig unmöglich – wobei es allerdings nicht klar ist, ob Menschen gegen eine Robotermannschaft antreten würden.

## Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle zum einen bei meiner Arbeitsgruppe bedanken, ohne deren Engagement und Einsatz unsere Erfolge im RoboCup nicht möglich gewesen wären. Zum anderen möchte ich mich bei all den Kollegen und Forschern bedanken, die auch die RoboCup-Idee fördern und unterstützen.

## Literatur

- [Bacchus, 2001] Fahiem Bacchus. The AIPS'00 planning competition. *The AI Magazine*, 22(3):47–56, 2001.
- [Bowling and Veloso, 2001] Michael Bowling und Manuela Veloso. An analysis of stochastic game theory for multiagent reinforcement learning. In C. Brodley and A. Danyluk, Hrsg., *Proceedings of the eighteenth International Conference on Machine Learning (ICML-2001)*, 2001.



- [Brooks, 1990] Rodney A. Brooks. Elephants don't play chess. In Pattie Maes, Hrsg., *Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology to Engineering and Back*, pages 3–16. MIT Press, Cambridge, MA, 1990.
- [Castel Pietra *et al.*, 2001] Claudio Castel Pietra, Luca Iocchi, Maurizio Piaggio, Alessandro Scalza und Antonio Sgorbissa. Communication and coordination among heterogeneous mid-size players: ART99. In Stone *et al.* [2001], pages 86–95.
- [Dietl *et al.*, 2001] Markus Dietl, Jens-Steffen Gutmann und Bernhard Nebel. Cooperative sensing in dynamic environments. In IROS-2001 [2001]. To appear.
- [Enokida *et al.*, 2001] Shuichi Enokida, Takeshi Ohasi, Takaichi Yoshida und Toshiaki Ejima. Extended Q-learning: Reinforcement learning using self-organized state space. In Stone *et al.* [2001], pages 129–138.
- [IROS-2001, 2001] IEEE/RSJ. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2001)*, 2001.
- [Isekenmeier *et al.*, 2001] Guido Isekenmeier, Bernhard Nebel und Thilo Weigel. Evaluation of the performance of CS Freiburg 1999 and CS Freiburg 2000. In *International RoboCup Symposium*, 2001. To appear.
- [Jäger und Nebel, 2001] Markus Jäger und Bernhard Nebel. Decentralized collision avoidance, deadlock detection, and deadlock resolution for multiple mobile robots. In IROS-2001 [2001]. To appear.
- [Kitano *et al.*, 1997] Hiroaki Kitano, Minoru Asada, Yasuo Kuniyoshi, Itsuki Noda, Eiichi Osawa und Hitoshi Matsubara. RoboCup: A challenge problem for AI. *The AI Magazine*, 18(1):73–85, 1997.
- [Kitano *et al.*, 1999] Hiroaki Kitano, Satoshi Tadokoro, Itsuki Noda, Hitoshi Matsubara, Tomoichi Takahashi, Atsuh Shinjou und Susumu Shimada. RoboCup Rescue: Search and rescue in large-scale disasters as a domain for autonomous agents research. In *Proceedings of IEEE Conference on Man, Systems, and Cybernetics (SMC-99)*, 1999.
- [Mackworth, 1993] Alan K. Mackworth. On seeing robots. In A. Basu und X. Li, Hrsg., *Computer Vision: Systems, Theory, and Applications*, pages 1–13. World Scientific Press, Singapore, 1993.

- [Simon und Newell, 1958] Herbert A. Simon und Alan Newell. Heuristic problem solving: The next advance in operations research. *Operations Research*, 6:1–10, 1958. Based on talk given 1957.
- [Stone *et al.*, 2001] P. Stone, G. Kraetzschmar und T. Balch, Hrsg. *RoboCup-2000: Robot Soccer World Cup IV*. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001.
- [Sutcliffe, 2001] Geoff Sutcliffe. Evaluating general purpose automated theorem proving systems. *Artificial Intelligence*, 131(1–2):39–54, 2001.
- [Weigel *et al.*, 2001] Thilo Weigel, Willi Auerbach, Markus Dietl, Burkhard Dümmler, Jens-Steffen Gutmann, Kornel Marko, Klaus Müller, Bernhard Nebel, Boris Szerbakowski und Maximilian Thiel. CS Freiburg: Doing the right thing in a group. In Stone *et al.* [2001], pages 52–63.
- [Wellman *et al.*, 2001] Michael P. Wellman, Peter R. Wurman, Kevin O’Malley, Roshan Bangera, Shou de Lin, Daniel Reeves und William E. Walsh. Designing the market game for a trading agent competition. *IEEE Internet Computing*, 5(2):43–51, 2001.