

Thema:

**Evolution von Fußballrobotern  
am Beispiel des Teams „CS Freiburg“**

**Ausarbeitung**

im Rahmen des Seminars „Agenten und Robotfußball“

im Fachgebiet Informatik  
am Lehrstuhl für Informatik

Themensteller: Prof. Dr. W.-M. Lippe

Betreuer: Dr. Dieter Lammers

vorgelegt von: Markus Vinnbruck  
Überwasserstr. 28  
48143 Münster  
markusvinnbruck@uni-muenster.de

Abgabetermin: 2003-07-14

## **Inhaltsverzeichnis**

1	„CS Freiburg“: Ex-Weltmeister im Robotfußball.....	1
2	Entwicklungshistorie des Teams „CS Freiburg“ .....	2
2.1	Grundlegende Team-Architektur .....	2
2.2	Robotergenerationen .....	3
2.2.1	RoboCup 1998.....	3
2.2.2	RoboCup 1999.....	8
2.2.3	RoboCup 2000.....	11
2.2.4	RoboCup 2001.....	13
2.3	Weitere Entwicklungen unabhängig vom RoboCup.....	14
3	Quantifizierbarkeit des Fortschritts im Robotfußball .....	15
4	Zusammenfassung und Ausblick .....	16

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Architektur der Roboter des „CS Freiburg“ .....	2
Abb. 2:	Team-Architektur des „CS Freiburg“ .....	3
Abb. 3:	Ablaufschema der Wahrnehmung.....	5
Abb. 4:	Entscheidungsbaum für die Aktionsauswahl .....	6
Abb. 5:	Rollen und Kompetenzbereiche .....	7
Abb. 6:	Pfadplanung mit der Methode des erweiterten Sichtbarkeitsgraphen.....	7
Abb. 7:	Teil des erweiterten Verhaltensnetzwerks des „CS Freiburg“ .....	9
Abb. 8:	Pfadplanung nach Potenzialfeld-Methode .....	10
Abb. 9:	Vergleich von Pfadplanungsmethoden .....	10

## Abkürzungsverzeichnis

FIFA	Fédération Internationale de Football Association
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE 1394: “Firewire”-Standard)
KI	Künstliche Intelligenz
LAN	Local Area Network
MAS	Multi-Agenten-System
RoboCup	Name einer internationalen Forschungsinitiative für den Bereich KI und Robotik, gleichzeitig aber auch die Abkürzung für die jährlich stattfindenden Weltmeisterschaften für diesen Bereich, in deren Mittelpunkt die Wettkämpfe im Robotfußball stehen

## 1 „CS Freiburg“: Ex-Weltmeister im Robotfußball

Der Robotfußball stellt ein wissenschaftlich anspruchsvolles Forschungsgebiet dar, das Problemlösungen aus den Bereichen Robotik, Künstliche Intelligenz (KI) und Multi-Agenten-Systeme (MAS) sowie die Integration dieser Lösungen in einem System erfordert.<sup>1</sup> Die Veranstaltung von nationalen und internationalen Wettkämpfen seit Mitte der neunziger Jahre hat dem Robotfußball zu ständig wachsender Popularität verholfen, sowohl seitens steigender Zuschauerzahlen als auch seitens einer zunehmenden Anzahl von Teilnehmern. Die teilnehmenden Teams werden so zur kontinuierlichen Weiterentwicklung ihrer Roboter getrieben, zum einen durch die stärker werdende Konkurrenz, zum anderen aber auch durch Regeländerungen, die immer höhere Anforderungen an die Roboter stellen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Evolution der Fußballroboter während der letzten Jahre bzw. die Fortschritte, die in einzelnen Teilbereichen des Robotfußballs (Motorik, Wahrnehmung, Kooperation etc.) erreicht wurden, zu verdeutlichen. Die Beschreibung der Weiterentwicklungen erfolgt am Beispiel des Teams der Universität Freiburg („CS Freiburg“)<sup>2</sup>, weil es seit der zweiten Weltmeisterschaft im Robotfußball regelmäßig am RoboCup<sup>3</sup> teilgenommen hat und mit drei Titelgewinnen<sup>4</sup> in der sog. „Middle-Sized League“<sup>5</sup> außerdem zu den erfolgreichsten Mannschaften zählt.

Kapitel 2 schildert zunächst die allgemeine Architektur des Teams „CS Freiburg“, bevor auf die einzelnen Robotergenerationen eingegangen wird, die an den Weltmeisterschaften der Jahre 1998 bis 2001 teilgenommen haben. Verbesserungen an den Robotern, die in den darauf folgenden Jahren, in denen der „CS Freiburg“ nicht beim RoboCup angetreten ist, vorgenommen wurden, werden anschließend in einem Abschnitt zusammengefasst. Kapitel 3 beschäftigt sich dann mit der Frage, ob beim Vergleich der verschiedenen Robotergenerationen tatsächlich messbare Fortschritte zu erkennen sind, bevor in Kapitel 4 abschließend ein Fazit gezogen wird.

---

<sup>1</sup> Vgl. Gutmann, Nebel, Reetz (2000), S. 345.

<sup>2</sup> Vgl. CS Freiburg (2001).

<sup>3</sup> RoboCup ist zunächst der Name einer internationalen Forschungsinitiative für den Bereich KI und Robotik, gleichzeitig aber auch die Abkürzung für die jährlich stattfindenden Weltmeisterschaften in diesem Bereich, in deren Mittelpunkt die Wettkämpfe im Robotfußball stehen. Zur näheren Information vgl. RoboCup Federation (2003).

<sup>4</sup> Weltmeister 1998, 2000, 2001; 3. Platz 1999.

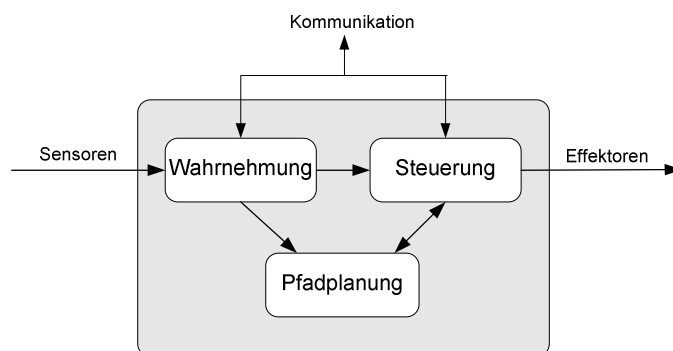
<sup>5</sup> Der RoboCup wird in verschiedenen Ligen ausgetragen. Für den Bereich des Fußballs waren dies ursprünglich eine reine Simulationsliga sowie zwei Ligen für echte Roboter („Small-Sized“, „Middle-Sized“); mittlerweile existieren zusätzlich noch eine Liga für humanoide Roboter und die „Sony 4-legged League“ für Roboter-Hunde. Zur näheren Information vgl. RoboCup Federation (2003).

## 2 Entwicklungshistorie des Teams „CS Freiburg“

### 2.1 Grundlegende Team-Architektur

Das Team „CS Freiburg“ besteht aus mehreren Robotern, die autonom auf dem Spielfeld agieren, und einem zusätzlichen Server-Modul, das außerhalb des Spielfeldes positioniert ist und über das die Roboter miteinander kommunizieren.

Alle Roboter haben grundsätzlich die gleiche Architektur (vgl. Abb. 1): Jeder besitzt ein Wahrnehmungsmodul, ein Steuerungsmodul und ein Modul zur Pfadplanung.<sup>6</sup> Zunächst am wichtigsten ist dabei das *Wahrnehmungsmodul*. Durch die Auswertung der Sensordaten kann der Roboter seine Position bestimmen (Selbst-Lokalisierung), andere Spieler sowie den Ball erkennen und daraufhin ein Modell seiner Umwelt erstellen. Auf Basis des so gewonnenen Weltmodells bestimmt dann das *Steuerungsmodul* über vordefinierte Verhaltensregeln abhängig von der jeweiligen Situation die nächste auszuführende Aktion und setzt diese mit Hilfe seiner Effektoren (Schussvorrichtung, Antriebsmotor etc.) um. Beinhaltet diese Aktion eine Bewegung des Roboters, wird im *Pfadplanungsmodul* der günstigste Weg zur gewünschten Zielposition berechnet.



Quelle: Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 97.

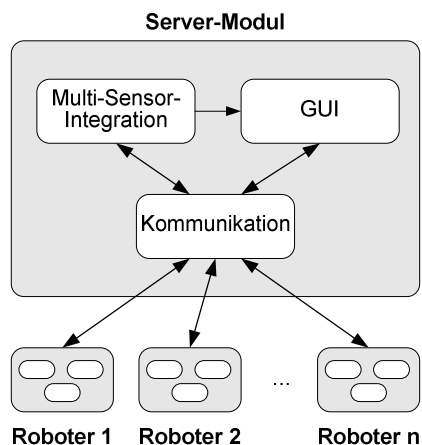
**Abb. 1:** Architektur der Roboter des „CS Freiburg“

Das zusätzliche *Server-Modul* dient hauptsächlich der Fusion der Sensordaten, die durch die einzelnen Roboter separat gesammelt wurden. Auf diese Weise kann auf indirektem Wege ein globales Modell der Umwelt erstellt werden.<sup>7</sup> Dieses „globale Weltmodell“ wird per Funk an jeden Roboter zurück gesandt, wodurch dessen eigentlich lokal beschränkte Sicht erheblich erweitert wird.

<sup>6</sup> Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 97.

<sup>7</sup> Die Nutzung einer globalen Kamera, wie sie z. B. in der „small-sized league“ erlaubt ist, ist in der middle-sized league nicht gestattet.

Abbildung 2 stellt die Architektur des gesamten Teams noch einmal übersichtsartig dar.



Quelle: Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 97.

**Abb. 2:** Team-Architektur des „CS Freiburg“

## 2.2 Robotergenerationen

Im Folgenden wird die Evolution des Freiburger Teams anhand der verschiedenen Robotergenerationen beschrieben, die an den jährlich stattfindenden Weltmeisterschaften im Robotfußball teilgenommen haben. Dabei wird die Ausgangskonfiguration im Jahr der ersten Teilnahme (1998) ausführlich erläutert, während für die nachfolgenden Jahre nur die wesentlichen Modifikationen genannt werden.

### 2.2.1 RoboCup 1998

Der grundlegende Baustein des Freiburger Teams ist der serienmäßig produzierte Roboter „Pioneer 1“, der allerdings um viele Hard- und Softwarekomponenten ergänzt werden musste, um Fußball spielen zu können.<sup>8</sup>

#### *Informationsverarbeitung und Kommunikation*

Damit autonomes Handeln auf Basis einer lokalen Informationsverarbeitung möglich ist, verfügt jeder Roboter über ein Notebook („Toshiba Libretto 70CT“) mit einer Linux-Installation. Neben der Autonomie der Agenten ist in einem MAS aber auch die Kommunikation zwischen den Agenten unerlässlich, um überhaupt eine Koordination

<sup>8</sup> Vgl. Gutmann u. a. (1998); S. 2f.

der einzelnen Aktionen und damit eine vernünftige Kooperation der Agenten zu ermöglichen. Im Team „CS Freiburg“ erfolgt die Kommunikation über ein Funk-LAN.<sup>9</sup>

### *Motorik*

Zur Erweiterung der motorischen Grundfunktionen des „Pioneer 1“ ist jeder Roboter mit einer selbstkonstruierten Schussvorrichtung ausgestattet. Zudem besitzen alle Feldspieler an ihrer Vorderseite flexible Federn, die eine zielgerichtete Ballführung ermöglichen.<sup>10</sup>

### *Wahrnehmung*

Seine Umwelt nimmt der Roboter über eine Vielzahl von Sensoren wahr. Wichtigster Sensor zur *Selbst-Lokalisierung* ist ein Laserscanner („SICK PLS 200“), der mit einem Sichtfeld von 180° das Spielfeld mit einer Winkelauflösung von 0,5° und einer Entfernungsauflösung von 5cm ausmessen kann.<sup>11</sup> Fünf Mal pro Sekunde wird ein solcher Laserscan durchgeführt und mit einem a-priori-Modell des Spielfeldes verglichen. Durch das Matching von Liniensegmenten, die aus den Scan-Daten extrahiert werden, und einem vorgegebenen Linienmodell des Feldes kann die Position des Roboters relativ zuverlässig und genau bestimmt werden. Die zusätzliche Berücksichtigung von Odometriedaten, d. h. Daten über aufgezeichnete Bewegungen des Roboters, verbessert die Genauigkeit der Positionsbestimmung noch.

Nach der Selbst-Lokalisierung wird ein Algorithmus zur *Spielererkennung* ausgeführt. Dabei werden alle zum Spielfeldrand zugehörigen Scan-Punkte entfernt, so dass nur noch Punkte übrig bleiben, die von anderen Objekten stammen müssen. Durch Cluster-Bildung und Berechnung der zugehörigen Schwerpunkte wird anschließend auf die Position anderer Objekte (Roboter) geschlossen.

Eine zuverlässige *Ballerkennung* ist mit dem bisher beschriebenen Verfahren nicht möglich, da die Laserscanner zu hoch am Roboter angebracht sind. Daher sind alle Roboter zusätzlich mit einer Videokamera ausgestattet, die im Zusammenspiel mit dem angeschlossenen Bildverarbeitungssystem („Cognachrome Vision System“) das Finden und Verfolgen des Balles ermöglicht.<sup>12</sup> Sobald ein Objekt einer bestimmten Farbe (hier:

---

<sup>9</sup> Vgl. Gutmann u. a. (1998), S: 3.

<sup>10</sup> Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 96.

<sup>11</sup> Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 95.

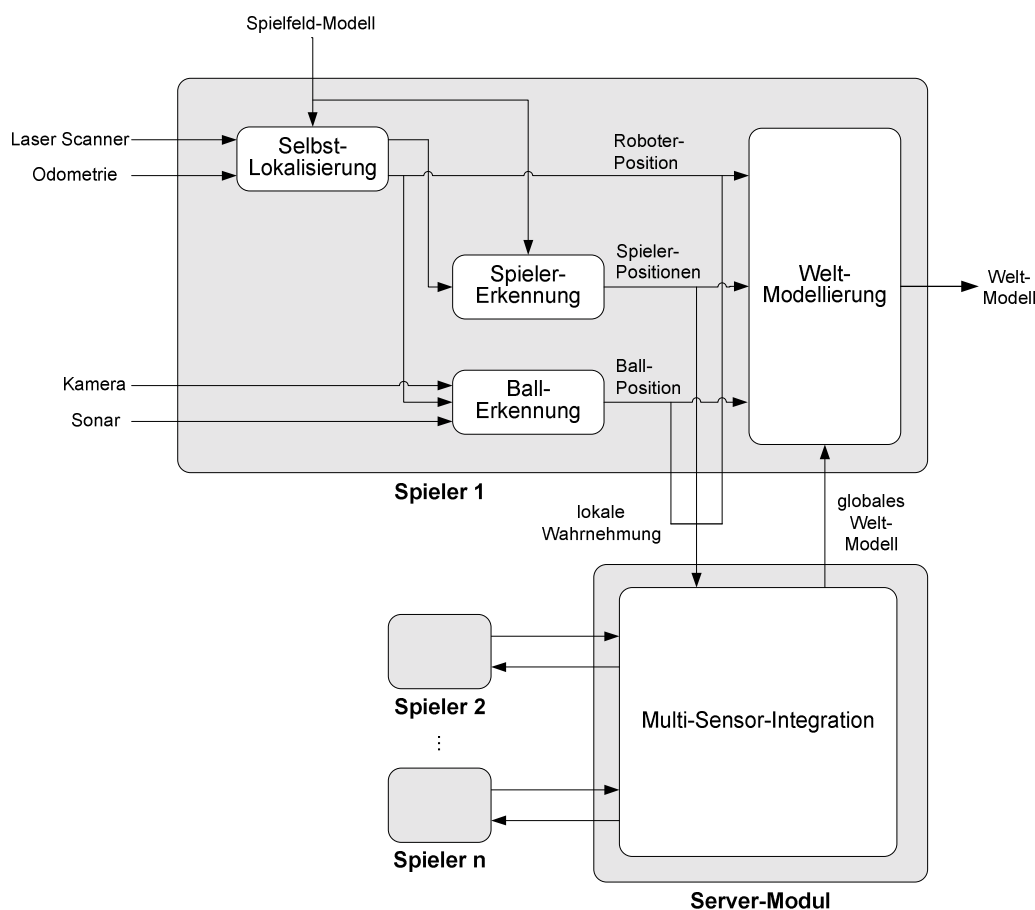
<sup>12</sup> Hier wird einer der wenigen Unterschiede zwischen Feldspielern und Torwart deutlich: Während die Kameras aller Feldspieler in Fahrtrichtung zeigen, ist die Kamera beim Torhüter an der linken Seite montiert, damit er sich seitlich hin und her bewegen kann, ohne dabei den Blick auf das Spielfeld zu verlieren.



das Rot/Orange des Balles) entdeckt worden ist, erfolgt ein Mapping der Pixel-Koordinaten dieses Objekts auf Koordinaten des Weltmodells. Sowohl das Mapping als auch das Erkennen bestimmter Farben muss der Roboter natürlich im Vorhinein lernen. Um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der visuell gewonnenen Daten zu verbessern, werden zur Bestimmung der Ballposition außerdem Sonar-Sensoren eingesetzt und weitere Schritte durchgeführt, z. B. eine Konturerkennung und Plausibilitätsprüfungen.<sup>13</sup>

Die Daten seiner lokalen Wahrnehmung schickt jeder Roboter an das Server-Modul, in dem alle lokalen Sichten zu einem globalen Weltmodell zusammengefügt werden. Dieses globale Modell, das wesentlich umfangreicher als die lokalen Modelle aber auch immer geringfügig veraltet ist, wird anschließend an alle Roboter zurück gesandt.<sup>14</sup>

Abbildung 3 stellt die Architektur des Wahrnehmungsmoduls noch einmal übersichtsa-rtig dar und zeigt zudem das Zusammenspiel mit dem Server-Modul zur Multi-Sensor-Integration.



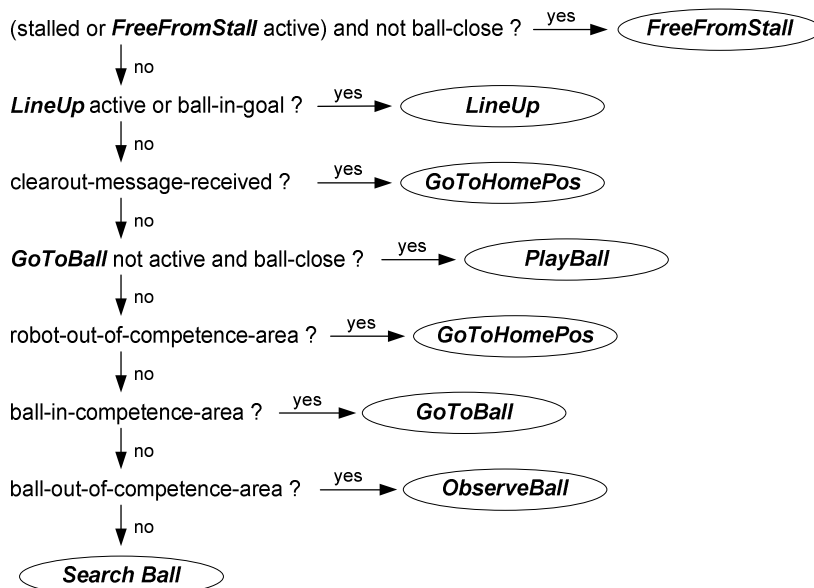
Quelle: Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 100.

**Abb. 3:** Ablaufschema der Wahrnehmung

<sup>13</sup> Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 97-100.

### Steuerung und Kooperation

Die Steuerung der Roboter erfolgt auf Basis des Weltmodells, das der Roboter über seine eigene Wahrnehmung und die Kommunikation mit dem Server-Modul erstellt hat. Abhängig von der Situation, in der sich der Roboter befindet, bestimmen vordefinierte Verhaltensregeln seine jeweilige Aktion bzw. Reaktion. Das Mapping von Situationen auf Aktionen erfolgt dabei mit Hilfe eines Entscheidungsbaums (vgl. Abb. 4).



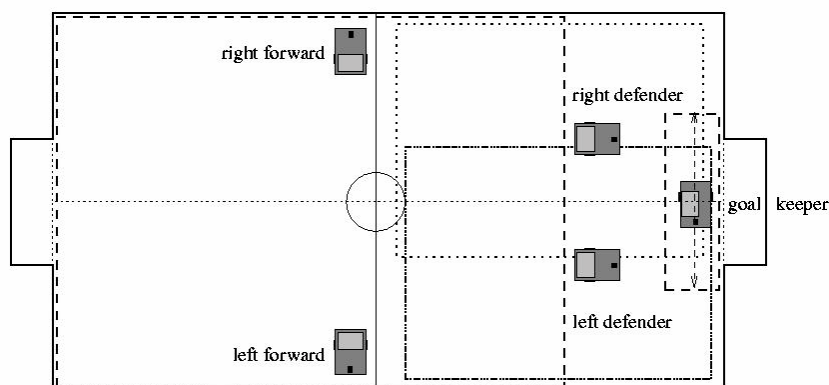
Quelle: Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 103

**Abb. 4:** Entscheidungsbaum für die Aktionsauswahl

Kooperatives Verhalten zwischen den Robotern wird durch die Verteilung von Rollen erreicht, welche die Kompetenzbereiche der Roboter und die anzuwendenden Regel-Sets festlegen. Die Rollenverteilung ist statisch: Es gibt einen Torwart, zwei Verteidiger und zwei Angreifer (vgl. Abb. 5). Vorteil dieser starren, wenn auch recht unflexiblen Struktur ist, dass durch die fest vorgegebenen Kompetenzbereiche auch bei Ausfall der Kommunikation ein gewisser Grad an Kooperation möglich ist.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 101f.

<sup>15</sup> Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 104.



Quelle: Gutmann u. a. (1999), S. 104.

**Abb. 5:** Rollen und Kompetenzbereiche

### *Pfadplanung*

Da die Bewegungsplanung bei Vorhandensein beweglicher Hindernisse extrem rechenaufwändig ist, beschränkt sich das Freiburger Team bei der Berechnung des optimalen Pfades auf einen approximativen Ansatz, der alle Hindernisse als stationär betrachtet.<sup>16</sup> Unter dieser Annahme erfolgt die Planung der Pfade geometrisch mit Hilfe der Methode des erweiterten Sichtbarkeitsgraphen. Objekte des Weltmodells werden dabei vergrößert und das Spielfeld verkleinert dargestellt, so dass die Pfadplanung für einen punktförmig angenommenen Roboter durchgeführt werden kann<sup>17</sup> (vgl. Abb. 6). Zur Berechnung des kürzesten, kollisionsfreien Weges wird ein A\*-Algorithmus<sup>18</sup> verwendet.



Quelle: Gutmann u. a. (1999), S. 106.

**Abb. 6:** Pfadplanung mit der Methode des erweiterten Sichtbarkeitsgraphen

<sup>16</sup> Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 105. Eine solche Vorgehensweise erscheint in einer dynamischen Umgebung zunächst zwar unangebracht, aber die Effizienz des Verfahrens, die eine laufende Neuplanung ermöglicht, gleicht die Ungenauigkeit des approximativen Ansatzes in ausreichendem Umfang aus.

<sup>17</sup> Vgl. Gutmann u. a. (1999), S. 106.

<sup>18</sup> Für nähere Informationen zum A\*-Algorithmus vgl. Lester (2003).

## 2.2.2 RoboCup 1999

### *Wahrnehmung*

Im Vergleich zum Vorjahr wurde die Wahrnehmung der Roboter durch den Einsatz neuer Laserscanner („Sick LMS 200“) verbessert. Eine genauere Entfernungsauflösung (1cm) sowie höhere Scan-Wiederholungsraten (25 Scans pro Sekunde) und die Modifikation des Bildverarbeitungssystems tragen dazu bei, das Weltmodell der Roboter exakter und aktueller zu gestalten.<sup>19</sup> Vor allem die Geschwindigkeit sich bewegender Objekte kann so wesentlich besser abgeschätzt werden.<sup>20</sup>

Auch die Fusion der von den einzelnen Robotern gewonnenen Sensordaten wurde verbessert. Während 1998 noch eine einfache Durchschnittsbildung erfolgte, die im Falle einer falschen Wahrnehmung eines Roboters gänzlich unbrauchbare Werte liefert, setzt das Modul zur Sensorintegration nun ein besser geeignetes Verfahren ein. Wegen jeweils unterschiedlicher Anforderungen muss dabei zwischen der Roboter- und der Ballerkennung unterschieden werden. Da bei der Erkennung von anderen Robotern die sehr präzisen Laserscanner zum Einsatz kommen, und die Sensordaten daher äußerst verlässlich sind, genügt zur Fusion der Daten ein einfacher Kalman-Filter<sup>21</sup>. Die Ballerkennung ist dagegen durch mögliche Probleme bei der visuellen Wahrnehmung (z. B. Reflektionen) relativ unzuverlässig. Deshalb wird hier eine Kombination von Markov-Lokalisierung und Kalman-Filterung verwendet. Dabei dient zunächst die Markov-Lokalisierung der Bestimmung der wahrscheinlichsten Ballposition, d. h. dem Ausschluss von Ausreißern, während anschließend die Fusion der restlichen Sensordaten durch Kalman-Filterung zur genaueren Bestimmung der Ballposition genutzt wird.<sup>22</sup>

### *Informationsverarbeitung*

Um die höheren Datenübertragungsraten bewältigen zu können, die bei der Nutzung der neuen Hardware zur Wahrnehmung anfallen, wurden die Roboter mit schnelleren Notebooks („Libretto 110CT“) sowie der Real-Time-Erweiterung von Linux („RTLinux“) ausgestattet.<sup>23</sup>

---

<sup>19</sup> Vgl. Weigel u. a. (2001), S: 53f.

<sup>20</sup> Vgl. Nebel, Gutmann, Hatzack (2000), S. 704.

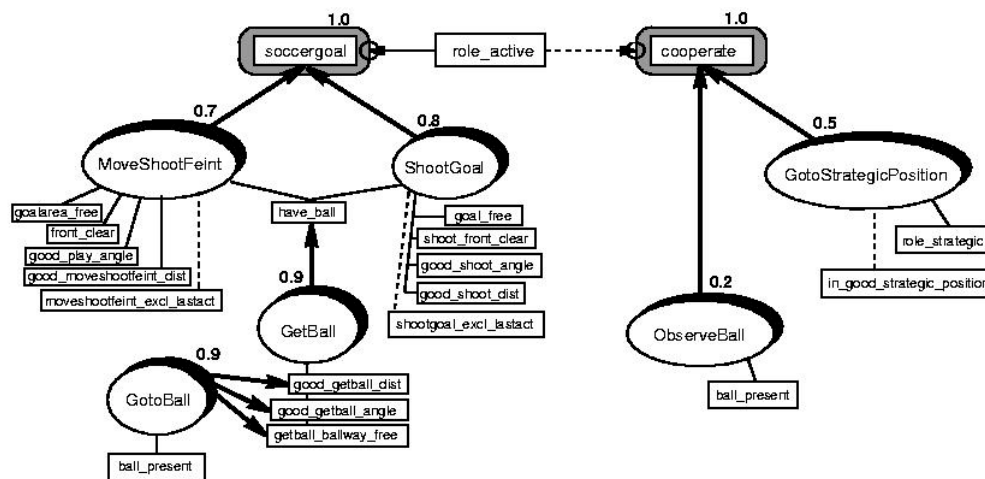
<sup>21</sup> Für nähere Informationen zu Kalman-Filtern vgl. Kalman (1960); Maybeck (1979).

<sup>22</sup> Vgl. Dietl, Gutmann, Nebel. (2002), S. 134-138; Dietl, Gutmann, Nebel (2001), S. 1706-1711.

<sup>23</sup> Vgl. Nebel, Gutmann, Hatzack (2000), S. 704.

### Steuerung und Kooperation

Die Realisierung der Aktionsauswahl über wenige hierarchisierte Regeln erwies sich als relativ unflexibel und wurde daher durch einen neuen Ansatz ersetzt, der auf Verhaltensnetzwerken<sup>24</sup> basiert. Wesentliche Bestandteile eines solchen Verhaltensnetzwerkes sind sog. Aktionsmodule, die eine Situationsanalyse sowie die Durchführung und Ablaufkontrolle von Aktionen zusammenfassen. Ein Modul besteht folglich aus einer Liste von Vorbedingungen bzw. Invarianten, die vor bzw. während der Ausführung der Aktion erfüllt sein müssen, einer Aktionsbeschreibung, einer Aktivierungsfunktion (zur Berechnung des Nutzens der Aktion in der jeweiligen Situation) sowie einer Kontrollfunktion. In einer konkreten Spielsituation wird dann genau die Aktion ausgewählt, die den größten Nutzen verspricht, d. h. den höchsten Wert der Aktivierungsfunktion besitzt.<sup>25</sup>



Quelle: Weigel u. a. (2001), S. 62.

**Abb. 7:** Teil des erweiterten Verhaltensnetzwerkes des „CS Freiburg“

Um die Kooperation zwischen den Robotern zu verbessern, wurde zudem das Konzept eines festen Kompetenzbereichs für jeden Roboter aufgegeben. Stattdessen wurde eine dynamische Rollenverteilung realisiert, bei der die Feldspieler flexibel auf die jeweilige Spielsituation reagieren und ggf. ihre Rollen tauschen können.

### Pfadplanung

Da die im Vorjahr verwendete geometrische Methode des erweiterten Sichtbarkeitsgraphen den Nachteil hatte, abhängig vom gewählten Mindestabstand zu Hindernissen zu sein, wurde sie durch ein neues, auf Potenzialfeldern basierendes Verfahren ersetzt. Bei

<sup>24</sup> Zu Verhaltensnetzwerken und ihren Erweiterungen vgl. Maes (1990) und Dorer(1999).

<sup>25</sup> Vgl. Gutmann, Nebel, Reetz (2000), S. 349; Weigel u. a. (2001), S. 61f;.

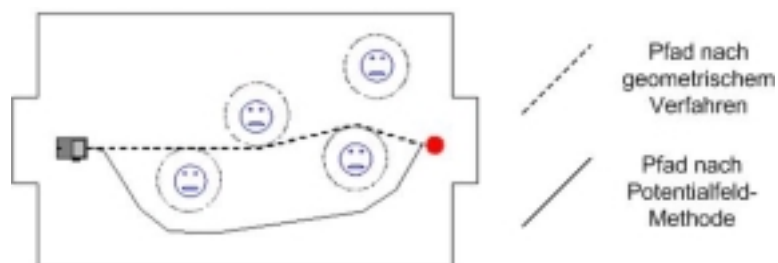
diesem Verfahren konstruiert der Roboter auf der Grundlage seines Weltbildes ein Potenzialfeld, das aus abstoßenden Kräften (hervorgerufen von gegnerischen Spielern und Feldbegrenzungen) sowie anziehenden Kräften (ausgehend von erstrebenswerten Positionen) besteht.<sup>26</sup> Der Algorithmus zur Pfadplanung startet mit der gewünschten Zielposition und folgt dann dem negativen Gradienten des Potenzialfeldes zum Roboter. So steuert der Roboter nicht versehentlich direkt auf evtl. im Weg befindliche Hindernisse zu, sondern umfährt sie bei laufender Neuplanung geschickt (vgl. Abb. 8).<sup>27</sup>



Quelle: Weigel u. a. (CSF2001) (2002), S. 31.

**Abb. 8:** Pfadplanung nach Potenzialfeld-Methode

Im Gegensatz zum geometrischen Verfahren wird so zwar nicht unbedingt der kürzeste Pfad gewählt, trotzdem ist der berechnete Weg aber i. d. R. der bessere, da er Hindernissen geschickt aus dem Weg geht und dadurch ggf. eine höhere Geschwindigkeit des Roboters erlaubt (vgl. Abb. 9).<sup>28</sup>



Quelle: Vgl. Weigel u. a. (CSF2001) (2002), S. 33.

**Abb. 9:** Vergleich von Pfadplanungsmethoden

<sup>26</sup> Vgl. Weigel u. a. (2001), S. 57.

<sup>27</sup> Vgl. Weigel u. a. (CSF2001) (2002), S. 31.

<sup>28</sup> Vgl. Weigel u. a. (CSF2001) (2002), S. 33.

### 2.2.3 RoboCup 2000

#### *Motorik*

Für den RoboCup 2000 wurden alle Roboter mit einer neuen Schussvorrichtung versehen, die härtere Schüsse (über das gesamte Spielfeld) ermöglicht. Zudem wurde die Ballführungsmechanik der Feldspieler verbessert: Die Federn zur Führung des Balles können nun auch in eine aufrechte Position gebracht werden, um Situationen zu vermeiden, in denen Roboter sich verhaken oder während einer Drehung nur versehentlich den Ball berühren.<sup>29</sup>

#### *Wahrnehmung*

Auch der Torwart wurde überarbeitet: Der nun verwendete Roboter „Pioneer DX-2“ kann schneller reagieren und durch die Ausstattung mit einer neuen Kamera („Sony EVI-D30“) den Ball wesentlich besser verfolgen.<sup>30</sup>

#### *Steuerung und Kooperation*

Im Bereich der Roboterkoordination und –kooperation wurde die Rollenverteilung für den RoboCup 2000 komplett neu gestaltet. Neben der weiterhin fest vergebenen Rolle des Torwarts existieren nun eine aktive, eine unterstützende und eine strategische Rolle, welche die Feldspieler unter sich aufteilen.<sup>31</sup> Während der aktive Spieler versucht, an den Ball zu kommen bzw. ihn in Richtung des gegnerischen Tores zu spielen, nimmt der strategische Spieler immer eine defensive Position in der eigenen Spielhälfte ein. Der unterstützende Spieler verhält sich der Spielsituation entsprechend: Befindet sich die eigene Mannschaft im Angriff, bewegt er sich auf eine günstige Position, um einen Pass zu empfangen; muss die eigene Mannschaft einen Angriff des Gegners abwehren, reiht er sich in die Defensivformation ein. Über die jeweilige Rollenverteilung verhandeln die Roboter untereinander anhand der Nutzwerte, die das Einnehmen der verschiedenen Rollen verspricht.<sup>32</sup>

Zudem wurde das 1999 eingeführte Verhaltensnetzwerk und das Aktionsrepertoire der Roboter erweitert. Während der Torwart mit wenigen Fähigkeiten wie z. B. *SearchBall* (Rotation, falls kein Ball in Sicht), *BlockBall* (Minimierung der Angriffsfläche durch Ausgleich der Winkel zwischen Torwart und Torpfosten) und *InterceptBall* (Abfangen des Balles) auskommt, ist das Repertoire der Feldspieler wesentlich umfangreicher. Da

---

<sup>29</sup> Vgl. Weigel u. a. (2001), S. 54.

<sup>30</sup> Vgl. Nebel, Weigel (2000), S. 2.

<sup>31</sup> Vgl. auch im Folgenden Weigel u. a. (2001), S. 56; Nebel, Weigel (2000), S. 8.

<sup>32</sup> Vgl. Weigel u. a. (CSF2001) (2002), S. 35f.

eine Beschreibung aller Fähigkeiten den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, seien hier beispielhaft nur einige besondere Fähigkeiten genannt, die aufgrund in der Vergangenheit festgestellter Mängel in diesem Jahr hinzugefügt wurden. Ein Problem war z. B., dass die Freiburger Roboter relativ langsam zum Ball gingen, um diesen unter Kontrolle zu bringen. Um in kritischen Situationen jedoch einfach schneller am Ball zu sein als der Gegner, fährt der Roboter nun mit Hilfe der Fähigkeit *BumpShootOffense/Defense* einfach mit höchstem Tempo vor den Ball, ohne überhaupt zu versuchen diesen anzunehmen. So kann der Ball zwar nicht genau kontrolliert werden, aber die auf Kosten der Präzision erzielte Schnelligkeit kann in manchen Situationen von entscheidendem Vorteil sein. Ein anderes Problem des Vorjahres waren Platzverweise für Roboter, die sich (z. B. bei einem Festsitzen des Balles) zu lange im Torraum aufhielten. Damit die Roboter die Strafzone ggf. rechtzeitig verlassen, wurden sie mit der neuen Fähigkeit *LeavePenaltyArea* ausgestattet.<sup>33</sup>

---

<sup>33</sup> Vgl. Weigel u. a. (2001), S. 58ff.



## 2.2.4 RoboCup 2001

### *Motorik*

Nachdem im Jahr 2000 bereits der Torwart erheblich überarbeitet wurde, galten im darauf folgenden Jahr die meisten Verbesserungen den Feldspielern. Die Installation von „Pioneer-2“-Boards und eines neuen Hinterrads ermöglichen schnellere und präzisere Bewegungen der Roboter, obwohl immer noch derselbe Motor verwendet wird.<sup>34</sup>

### *Wahrnehmung und Informationsverarbeitung*

Für den RoboCup 2001 wurde das bisherige Visionssystem der Feldspieler, bestehend aus einer Videokamera und dem „Cognachrome Vision System“, durch eine Digitalkamera („Sony DFW-V500“) und eine selbstentwickelte Bildverarbeitungssoftware ersetzt. Durch den Einsatz eines neuen Notebooks mit IEEE-1394-Schnittstelle („Sony Vaio PCG-CIVE“) konnte gleichzeitig auch der Datentransfer zwischen Kamera und Notebook vereinfacht werden.<sup>35</sup>

### *Pfadplanung*

Um einige Probleme bei der Pfadplanung nach Potenzialfeldmethode zu lösen, wurde der bisher verwendete Algorithmus erweitert. Damit z. B. verhindert werden kann, dass der Spieler in Ballbesitz von eigenen Mannschaftskameraden versehentlich behindert wird, werden vor dem ballführenden Spieler künstliche Zusatzpotenziale erzeugt, so dass sich die Mannschaftskameraden immer einen Weg hinter ihrem Teamkollegen suchen. Ein weiteres Problem der Pfadplanung ist die sog. Oszillation, d. h. das ständige Wechseln eines Roboters zwischen zwei alternativen Wegen um ein Hindernis, das durch unsaubere Sensordaten hervorgerufen werden kann. Um eine dadurch verursachte „Unentschlossenheit“ des Roboters zu vermeiden, wird basierend auf dem im vorigen Zyklus berechneten Pfad eine Schwerpunktverschiebung bei Potenzialfeldern von Hindernissen durchgeführt. Aufgrund dieser Verschiebung wird dann bei einer erneuten Pfadplanung wieder derselbe Weg um das Hindernis ermittelt wie zuvor.<sup>36</sup>

---

<sup>34</sup> Vgl. Weigel u. a. (CSF2001) (2002), S. 27.

<sup>35</sup> Vgl. Weigel u. a. (CSF2001) (2002), S. 27.

<sup>36</sup> Vgl. Weigel u. a. (CSF2001) (2002), S. 31f.

### 2.3 Weitere Entwicklungen unabhängig vom RoboCup

Aus verschiedenen, vom Team nicht näher angegebenen Gründen hat der „CS Freiburg“ seit dem RoboCup 2001 nicht mehr an der Weltmeisterschaft (in der middle-sized league) teilgenommen. Mit dem Ziel, zukünftig jedoch wieder beim RoboCup anzutreten, wurden die Roboter trotzdem weiterentwickelt.

Eine Veränderung betrifft z. B. die Wahrnehmung der Roboter. Da die Banden als Feldbegrenzung ab dem Jahr 2002 durch eine Reihe von Pfosten entlang des Spielfeldrandes ersetzt wurden, musste das in Abschnitt 2.2.1 beschriebene Verfahren zur Selbst-Lokalisierung angepasst werden. Die Liniensegmente, die der Roboter bis dahin einfach aus den Daten eines Laserscans extrahieren konnte, müssen nun künstlich rekonstruiert werden. Nach dem Clustering eines Scans wird dazu der Abstand zwischen zwei Clustern gemessen; stimmt dieser mit dem bekannten Standardabstand zwischen zwei Begrenzungspfosten überein, wird eine virtuelle Linie zwischen den beiden Clustern gezogen.<sup>37</sup> Die so ermittelten Linien kann der Roboter dann mit dem Modell des Spielfeldes vergleichen, um seine eigene Position zu bestimmen.

In dem Bestreben Roboter zu entwickeln, die ihre Fähigkeiten durch eigenständiges Lernen kontinuierlich verbessern, setzt das Freiburger Team zudem seit einiger Zeit ein sog. „Reinforcement Learning“ ein. Dabei schreitet der Lernprozess des Roboters dadurch fort, dass der Roboter in den Handlungen „bestärkt“ wird, die in der Vergangenheit zu Erfolgen geführt haben. Zu diesem Zweck wird die in einer bestimmten Situation gewählte Aktionsfolge zur Erreichung eines Ziels abhängig von ihrem Resultat (Erfolg/Misserfolg) über ein Belohnungssystem bewertet: Für einen Erfolg (Ziel erreicht) erhält der Roboter eine virtuelle Belohnung, ein Misserfolg (Ziel nicht erreicht) wird „bestraft“, d. h. negativ belohnt. Um kürzere Aktionsfolgen, d. h. schnellere und somit bessere Lösungen, zu verwirklichen, ist zusätzlich jede einzelne Aktion mit einer geringfügigen „Bestrafung“ verbunden. So lernt der Roboter im Laufe der Zeit, die für die Zielerreichung am besten geeigneten Aktionsfolgen zu wählen.<sup>38</sup>

---

<sup>37</sup> Vgl. Weigel u. a. (CRSSP) (2002), S.687.

<sup>38</sup> Vgl. Weigel u. a. (CRSSP) (2002), S.694f.

### 3 Quantifizierbarkeit des Fortschritts im Robotfußball

Im vorhergehenden Kapitel wurde eine Vielzahl von technischen Neuerungen beschrieben, die im Bereich des Robotfußballs im Laufe der letzten Jahre eingeführt wurden. Eine wichtige Frage, die in diesem Zusammenhang gestellt werden kann, ist, ob tatsächlich ein Fortschritt messbar ist. Um eine exakte Quantifizierung der Fortschritte zu ermöglichen, hat das Team der Universität Freiburg versucht, eine Reihe von Kriterien zu identifizieren, die eine adäquate Evaluation und somit einen Vergleich der Spielniveaus und Mannschaftsstärken erlauben.<sup>39</sup>

Beim Vergleich der Weltmeisterschaften 1999 und 2000 konnte z. B. festgestellt werden, dass die Anzahl der Situationen, in denen kein Spieler am Ball ist, abgenommen hat, die Anzahl der Situationen, in denen beide Teams um den Ball kämpfen (d. h. mindestens ein Spieler jedes Teams am Ball ist), dagegen zugenommen. Beide Phänomene sind wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die meisten Roboter durch eine verbesserte Wahrnehmung und Motorik wesentlich aktiver in das Spielgeschehen eingreifen können.<sup>40</sup>

Bezogen auf das Team „CS Freiburg“ schlagen sich auch Verbesserungen der Schussvorrichtung und des Ballführungsmechanismus in der Statistik nieder: Die durchschnittliche Schussweite wurde erhöht, Ballverluste während eines Dribblings ohne Hindernisse wurden reduziert und Dribblings mit Hindernissen konnten häufiger mit einem Torschuss abgeschlossen werden; auch die Gesamtzahl der Schüsse auf das gegnerische Tor hat zugenommen. Dass sich insgesamt die Anzahl der Dribblings mit Hindernissen erhöht hat, lässt indirekt auch auf eine verbesserte Positionierung der gegnerischen Roboter schließen.<sup>41</sup>

---

<sup>39</sup> Vgl. auch im Folgenden Isekenmeier, Nebel, Weigel (2002).

<sup>40</sup> Vgl. Isekenmeier, Nebel, Weigel (2002), S. 394-396.

<sup>41</sup> Vgl. Isekenmeier, Nebel, Weigel (2002), S. 396

## **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Ziel dieser Arbeit war es, einen Einblick in die auf dem Gebiet des Robotfußballs bisher gemachten Fortschritte zu geben. Zu diesem Zweck wurden am Beispiel des Teams der Universität Freiburg („CS Freiburg“) die wesentlichen technischen Weiterentwicklungen beschrieben, die an den Robotern im Laufe der Jahre vorgenommen wurden. Anschließend wurde zudem gezeigt, dass die Evolution der Fußballroboter jedoch nicht nur an den Weiterentwicklungen ihrer Komponenten sichtbar ist, sondern dass die erzielten Fortschritte auch mit Hilfe entsprechender Kriterien mess- und nachweisbar sind.

Allerdings bleibt festzuhalten, dass es bis zu dem offiziellen Ziel der RoboCup-Initiative, nämlich im Jahr 2050 das menschliche Fußball-Weltmeister-Team zu besiegen, noch ein langer Weg ist. Obwohl in jedem Jahr die Regeln beim RoboCup verschärft und somit Vereinfachungen reduziert werden, besteht noch ein gravierender Unterschied zu den FIFA-Regeln, wie sie im wirklichen Fußball Anwendung finden; lediglich die Simulationsliga bildet die Realität schon relativ genau ab. Bis echte Roboter einer so komplexen und dynamischen Umgebung wie der eines realen Fußballspiels gewachsen sein werden, müssen noch eine Vielzahl weiterer Fortschritte im Bereich der KI und MAS gemacht werden.

## Literaturverzeichnis

- CS Freiburg: CS Freiburg - The Robotic Soccer Team. 2001. <http://www.cs-freiburg.de>.  
Abrufdatum: 2003-07-12.
- Dietl, M.; Gutmann, J.-S.; Nebel, B.: Cooperative Sensing in Dynamic Environments.  
In: International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Miami  
2001, S: 1706-1713.
- Dietl, M.; Gutmann, J.-S.; Nebel, B.: CS Freiburg: Global View by Cooperative Sensing.  
In: RoboCup 2001: Robot Soccer World Cup V. Hrsg: A. Birk,  
S. Gradeschi, S. Tadokoro. Berlin et al. 2002, S. 133-143.
- Dorer, K.: Behaviour Networks for Continuous Domains using Situation-Dependent  
Motivations. In: International Joint Conference on Artificial Intelligence  
(IJCAI). 1999:9, S. 1233-1238.
- Gutmann, J.-S. u. a.: The CS Freiburg Team. In: RoboCup-98: Robot Soccer World Cup  
II. Proceedings of the Second RoboCup Workshop. Hrsg: M. Hasada. Paris,  
1998.
- Gutmann, J.-S. u. a.: The CS Freiburg Robotic Soccer Team: Reliable Self-Localization,  
Multirobot Sensor Integration, and Basic Soccer Skills. In: RoboCup-98 Soccer  
World Cup II. Hrsg: M. Asada, H. Kitano. Berlin et al. 1999, S. 93-108.
- Gutmann, J.-S.; Nebel, B.; Reetz, C.: CS Freiburg: Architektur und Aktionsauswahl im  
Roboterfußball. In: Proceedings AMS-2000. Karlsruhe 2000, S. 345-352.
- Isekenmeier, G.; Nebel, B.; Weigel, T.: Evaluation of the Performance of CS Freiburg  
1999 and CS Freiburg 2000. In: RoboCup 2001: Robot Soccer World Cup V.  
Hrsg: A. Birk, S. Gradeschi, S. Tadokoro. Berlin et al. 2002, S. 393-398.
- Kalman, R. E.: A New Approach To Linear Filtering and Prediction Problems. In:  
Transaction of the ASME – Journal of Basic Engineering. 1960, S. 35-45.
- Lester, P.: A\* Pathfinding for Beginners.  
<http://www.policyalmanac.org/games/aStarTutorial.htm>. Abrufdatum: 2003-  
07-12.
- Maes, P.: Situated Agents Can Have Goals. In: Designing Autonomous Agents: Theory  
and Practice from Biology to Engineering and Back. Hrsg: P. Maes. Cam-  
bridge, London 1990, S. 49-70.
- Maybeck, P. S.: Stochastic models, estimation and control. New York et al. 1979, S. 1-  
16.
- Nebel, B.; Gutmann, J.-S.; Hatzack, W.: CS Freiburg '99. In: RoboCup-99: Robot Soc-  
cer World Cup III. Hrsg: M. Veloso, E. Pagello, H. Kitano. Berlin et al. 2000,  
S. 703-706.
- Nebel, B.; Weigel, T.: CS Freiburg 2000. In: Fourth International Workshop on Ro-  
boCup. Melbourne 2000.
- RoboCup Federation: What is RoboCup. 2003.  
<http://www.robocup.org/overview/21.html>. Abrufdatum 2003-06-10.

- Weigel, T. u. a.: CS Freiburg: Doing the Right Thing in a Group. In: RoboCup 2000: Robot Soccer World Cup IV. Hrsg: P. Stone, T. Balch, G. Kraetzschmar. Berlin et al. 2001, S.52-63.
- Weigel, T. u. a. (CSF2001): CS Freiburg 2001. In: RoboCup 2001: Robot Soccer World Cup V. Hrsg: A. Birk, S. Gradeschi, S. Tadokoro. Berlin et al. 2002, S. 26-38.
- Weigel, T. u. a. (CRSSP): CS Freiburg: Coordinating Robots for Successful Soccer Playing. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation. 18(5), 2002, S. 685-699.

## Anhang

### A Tabellarischer Überblick über die Evolution Roboter des „CS Freiburg“

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die jeweiligen Konfigurationen der Freiburger Roboter, in denen sie bei den Weltmeisterschaften der Jahre 1998-2001 angetreten sind. Neuentwicklungen des jeweiligen Jahres sind durch eine Hervorhebung im Schriftbild (Fett- und Kursivdruck) gekennzeichnet.

Jahr / Komponente	1998	1999	2000	2001
Roboter (Plattform)	Pioneer I	Pioneer I	Feldspieler: Pioneer I, <b>Torwart: Pioneer DX-2</b>	Feldspieler: Pioneer I ( <b>DX-2 Boards</b> ), Torwart: Pioneer DX-2
Informationsverarbeitung	Libretto 70CT (Linux)	<b>Libretto 110CT (RTLlinux)</b>	Libretto 110CT (RTLlinux)	<b>Feldspieler: Sony Vaio PCG-CIVE (IEEE 1394 Interface)</b> , Torwart: Libretto 110CT
Selbst-Lokalisierung	SICK Laserscanner PLS 200 (180°, 0.5° [1°], 5cm)	SICK Laserscanner <b>LMS 200</b> (180°, 0.5°, <b>1cm</b> ): <b>25 Scans/s</b>	SICK Laserscanner LMS 200 (180°, 0.5°, 1cm)	SICK Laserscanner LMS 200 (180°, 0.5°, 1cm)
Vision	Videokamera	Videokamera	Feldspieler: Videokamera <b>Torwart: Sony EVI-D30</b>	<b>Feldspieler: Sony DFW Digital</b> , Torwart: Sony EVI-D30
Sensor-Fusion	Durchschnittsbildung	<b>Markov-Lokalisierung + Kalman-Filtering</b>	Markov-Lokalisierung + Kalman-Filtering	Markov-Lokalisierung + Kalman-Filtering
Steuerung	Hierarchische Verhaltensregeln (Entscheidungsbaum)	<b>Erweiterte Verhaltensnetzwerke</b>	Erweiterte Verhaltensnetzwerke ( <b>erweitert</b> )	Erweiterte Verhaltensnetzwerke (erweitert)
Kooperation	Stat. Rollenverteilung, feste Kompetenzbereiche (Torwart + 2 Verteidiger/Angreifer)	<b>Dyn. Rollenverteilung (Torwart + Verteidiger, Mittelfeldspieler, Angreifer)</b>	Dyn. Rollenverteilung ( <b>Torwart + aktiv, strategisch, unterstützend</b> )	Dyn. Rollenverteilung (Torwart + aktiv, strategisch, unterstützend)
Pfadplanung	Methode des erweiterten Sichtbarkeitsgraphen (geometrisch)	<b>Potenzialfeld-Methode</b>	Potenzialfeld-Methode	Potenzialfeld-Methode ( <b>verbessert</b> )
Schussvorrichtung	Selbstgebaut (Märklin Metallbaukasten)	Selbstgebaut (Märklin Metallbaukasten)	<b>Verbesserte Schussvorrichtung (Sick AG)</b>	Verbesserte Schussvorrichtung (Sick AG)
Ballführung	Flexible Federn	Flexible Federn	Flexible Federn ( <b>umklappbar</b> )	Flexible Federn (umklappbar)
Kommunikation	Funk-LAN	Funk-LAN	Funk-LAN	Funk-LAN ( <b>11 Mbit/s</b> )

## **Abschließende Erklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich meine Ausarbeitung „Evolution von Fußballrobotern am Beispiel des Teams „CS Freiburg““ selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe, und dass ich alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng anlegenden Ausführungen meiner Arbeit besonders gekennzeichnet und die Quellen zitiert habe.

Münster, den 13. Juli 2003