

## Antragskurzfassung

Schwerpunktprogramm „Kooperierende Teams mobiler Roboter in dynamischen Umgebungen“  
(Geschäftszeichen: SPP 1125)

Antragsteller: Prof. Dr. Christoph Schlieder  
Dr. Ubbo Visser  
Arbeitsgruppe Intelligente Systeme  
Prof. Dr. Bernd Krieg-Brückner  
Dr. Thomas Röfer  
Bremer Institut für Sichere Systeme, Bereich „Kognitive Robotik“  
Technologie-Zentrum Informatik (TZI)  
Universität Bremen

Forschungsvorhaben: Automatische Diagnose von Strategien fremder mobiler Roboter in einem kooperativen, dynamischen Umfeld

Dauer: 6 Jahre  
hier: 1. und 2. Jahr

Antrag: Gewährung einer Sachbeihilfe in Höhe von  
und zwar für:

Personal:	2 wiss. Mitarbeiter BAT IIa für 24 Monate
	4 stud. Hilfskräfte, 19 h/Woche für 24 Monate
Kleingeräte:	40.200 DM
Verbrauchsmaterial:	6.000 DM
Reisekosten:	30.000 DM

Zusammenfassung des Forschungsvorhabens:

Im Rahmen des Schwerpunktprogramms soll die Technologie autonomer mobiler Roboter in kooperativen, dynamischen Umgebungen weiterentwickelt werden. Ein noch nicht ausreichend untersuchtes Problem innerhalb vieler Anwendungen autonomer Agenten ist eine adäquate Betrachtung des Umfelds. So ist es z.B. im Rahmen mobiler Rollstühle wichtig, nicht nur Objekte zu erkennen, sondern das Verhalten und die Aktionen anderer autonomer Agenten zu analysieren und ihre künftigen Aktionen zu antizipieren.

Anhand des RoboCup-Szenarios sollen Methoden entwickelt werden, die es ermöglichen, sowohl primitive Aktionen als auch komplexe Verhaltensweisen anderer autonomer Agenten zu klassifizieren, Aktionsfolgen und Strategien zu erkennen und selbst angemessen zu agieren und reagieren.

Die gesammelten Erkenntnisse sollen anschließend sowohl zur Steuerung eines autonomen Rollstuhls als auch zur Weiterentwicklung der Robustheit und Sicherheit in anderen relevanten Bereichen, wie z.B. in elektronischen Märkten, eingesetzt und evaluiert werden.



# **Automatische Diagnose von Strategien fremder mobiler Roboter in einem kooperativen, dynamischen Umfeld**

Antrag an die Deutsche Forschungsgemeinschaft  
auf Förderung im Rahmen des Schwerpunktprogramms  
„Kooperierende Teams mobiler Roboter  
in dynamischen Umgebungen“

an der

**Universität Bremen**

Oktober 2000

1	Allgemeine Angaben .....	1
2	Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten.....	3
3	Ziele und Arbeitsprogramm .....	19
4	Beantragte Mittel .....	31
5	Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens.....	33
6	Wirtschaftliche Verwertung .....	35
7	Erklärungen .....	36
8	Unterschriften.....	37
9	Verzeichnis der Anlagen .....	38



# 1 Allgemeine Angaben

Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Kooperierende Teams mobiler Roboter in dynamischen Umgebungen“ (Geschäftszeichen SPP 1125)

## 1.1 Antragsteller

Dr. Christoph Schlieder, Professor für Praktische Informatik (C4)  
Geburtsdatum: 31. 7. 1960 Nationalität: deutsch  
FB3 Mathematik und Informatik  
Universität Bremen  
Postfach 33 04 40  
D-28334 Bremen  
Tel. (0421) 218 – 70 89  
Fax (0421) 218 – 71 96

*Private Anschrift:*  
Holbeinstr. 18  
28209 Bremen  
Tel. (0421) 30 32 386  
Email: cs@informatik.uni-bremen.de

Dr. Ubbo Visser, Wissenschaftlicher Assistent (C1)  
Geburtsdatum: 23. 6. 1964 Nationalität: deutsch  
FB3 Mathematik und Informatik  
Universität Bremen  
Postfach 33 04 40  
D-28334 Bremen  
Tel. (0421) 218 – 78 40  
Fax (0421) 218 – 71 96

*Private Anschrift:*  
Gustaf-Heinemann-Str. 22  
D-28215 Bremen  
Tel. (0421) 43 40 860  
Email: visser@informatik.uni-bremen.de

Dr. Bernd Krieg-Brückner, Professor für Praktische Informatik (C4), Dekan  
Geburtsdatum: 15. 2. 1949 Nationalität: deutsch  
FB3 Mathematik und Informatik  
Universität Bremen  
Postfach 33 04 40  
D-28334 Bremen  
Tel. (0421) 218 – 36 60  
Fax (0421) 218 – 30 54

*Private Anschrift:*  
Rehsprung 28  
D-28355 Bremen  
Tel. (0421) 25 10 24  
Email: bkb@informatik.uni-bremen.de

Dr. Thomas Röfer, Wissenschaftlicher Assistent (C1)  
Geburtsdatum: 1. 3. 1967 Nationalität: deutsch  
FB3 Mathematik und Informatik  
Universität Bremen  
Postfach 33 04 40  
D-28334 Bremen  
Tel. (0421) 218 – 75 85  
Fax (0421) 218 – 30 54

*Private Anschrift:*  
Elsterstr. 39  
D-04109 Leipzig  
Tel. (0341) 98 06 230  
Email: roefer@informatik.uni-bremen.de

## **1.2 Thema**

Automatische Diagnose von Strategien fremder mobiler Roboter in einem kooperativen, dynamischen Umfeld

## **1.3 Kennwort**

Strategiediagnose

## **1.4 Fachgebiet und Arbeitsrichtung**

Künstliche Intelligenz, Kognitive Robotik

## **1.5 Voraussichtliche Gesamtdauer**

6 Jahre

## **1.6 Antragszeitraum**

2 Jahre

## **1.7 Gewünschter Beginn der Förderung**

1. 6. 2001

## **1.8 Zusammenfassung**

Im Rahmen des Schwerpunktprogramms soll die Technologie autonomer mobiler Roboter in kooperativen, dynamischen Umgebungen weiterentwickelt werden. Ein noch nicht ausreichend untersuchtes Problem innerhalb vieler Anwendungen autonomer Agenten ist eine adäquate Betrachtung des Umfelds. So ist es z.B. im Rahmen mobiler Rollstühle wichtig, nicht nur Objekte zu erkennen, sondern das Verhalten und die Aktionen anderer autonomer Agenten zu analysieren und ihre künftigen Aktionen zu antizipieren.

Anhand des RoboCup-Szenarios sollen Methoden entwickelt werden, die es ermöglichen, sowohl primitive Aktionen als auch komplexe Verhaltensweisen anderer autonomer Agenten zu klassifizieren, Aktionsfolgen und Strategien zu erkennen und selbst angemessen zu agieren und reagieren.

Die gesammelten Erkenntnisse sollen anschließend sowohl zur Steuerung eines autonomen Rollstuhls als auch zur Weiterentwicklung der Robustheit und Sicherheit in anderen relevanten Bereichen, wie z.B. in elektronischen Märkten, eingesetzt und evaluiert werden.

## 2 Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten

### 2.1 Stand der Forschung

Das hier beantragte Projekt ist in zwei wissenschaftlichen Bereichen angesiedelt: Multiagentensysteme in der Künstlichen Intelligenz und Kognitive Robotik. Bei Multiagentensystemen sind besonders Ansätze des Lernens und der Verhaltensadaption sowie der Kooperation und Koordination von Teams entscheidend. Die Kognitive Robotik liefert hingegen die notwendigen Grundlagen zur Steuerung und Kontrolle autonomer Agenten, aber auch zur Wahrnehmung von Aktionen in physikalischen Umfeldern. Der Stand der Technik wird entsprechend dieser beiden Bereiche vorgestellt.

#### 2.1.1 Multiagentensysteme

Seit Ende der 80er Jahre wird erheblich auf dem Gebiet der Softwareagenten und Multiagentensysteme geforscht, welches sich in einer sehr großen Zahl von Publikationen widerspiegelt (Jennings und Wooldridge, 1998; Weiß, 1999; Brenner *et al.*, 1998). Ein großer Bereich der Agentensystemforschung beschäftigt sich mit der Simulation einfacher natürlicher Entitäten zur Lösung von Optimierungsproblemen, z. B. Ameisenkolonien zur Tourenplanung (Bullnheimer *et al.*, 1997; Gambardella *et al.* 1999). Durch den Aufbau autonomer Roboter mit komplexer Sensorik sind jedoch eher Ansätze kooperativer Agentensysteme interessant (Klusch und Kerschberg, 2000; Faratin *et al.*, 1998). In Domänen mit einer natürlichen Verteiltheit, wie z.B. der Informationslogistik, zeigen sich Multiagentensystemen als sehr gut geeignet.

Im Allgemeinen können Agenten als Softwareartefakte verstanden werden, die fähig sind, ihr Umfeld wahrzunehmen und es zu verändern (Russel und Norvig, 1995). Sie können mit anderen Agenten Informationen austauschen und ihr Lebenszyklus hängt nicht direkt von dem eines anderen Agenten ab: „Agents are situated in an environment, act autonomously, and are able to sense and to react to changes.“ (Knirsch und Timm, 1999a). Jennings und Wooldridge, zwei der bedeutendsten europäischen Forscher im Bereich der Intelligenten Agenten, betonen im Wesentlichen die Aspekte der zielgerichteten Handlung aus eigenem Antrieb (pro-activeness), der Fähigkeit, auf Ereignisse zu reagieren (reactiveness) und der Kooperation mit anderen Agenten (social ability), z. B. durch Kommunikation (Wooldridge und Jennings, 1995). Es können zwei grundsätzliche Modellierungsansätze von Agenten unterschieden werden: entweder arbeiten Agenten gemeinsam an einem Problem (Müller, 1993; Zlotkin und Rosenschein, 1989; Jennings, 1992), oder sie verfolgen im Auftrag eines anderen Agenten ein bestimmtes Ziel (Maes, 1994; Luck und d’Inverno, 1995). Diese beiden wichtigen Ansätze, die verteilte Problemlösung und die Delegation, verfolgen unterschiedliche Absichten.

Im Rahmen der *Delegation* ist das Vorhandensein von anderen Agenten nicht zwingend, da es sich auch um einen einzelnen Agenten handeln kann, der z. B. zur Informationsbeschaffung im Internet ausgesandt wird (vgl. Softbots: Etzioni und Weld, 1994). Auf der anderen Seite wird innerhalb der Delegation vom Agenten eine gewisse Autonomie erwartet, d. h., dass der Auftraggeber einem Agenten nicht einen detaillierten Plan „mit auf den Weg gibt“, sondern dass der Agent selbst über eigenständige Planungsalgorithmen verfügen muss (Kalenka und Jennings, 1997). Im Verlauf seiner „Arbeit“ wird der Agent nicht direkt von außen kontrolliert und erhält durch die eigene Planung und seine (beschränkte) Unabhängigkeit im Handeln einen gewissen Grad an Autonomie (Ferber, 1999).

Ein wichtiger Aspekt im Bereich der *verteilten Problemlösung* ist die Koordination zwischen den Agenten (Axelrod, 1997; Rosenschein und Zlotkin, 1994). Dieses erfordert eine Art der Kommunikation, die nicht wie in der objekt-orientierten Systementwicklung nur aus dem Aufruf einer Methode eines anderen Objektes beruht. Vielmehr werden Informationen bzw. Wissensseinheiten zwischen den Agenten ausgetauscht, die einer explizit definierten Wissensrepräsentation, z.B. einer Ontologie, folgen (Conen und Neumann, 1998; Haddadi, 1995; Ossowski, 1999). Häufig basiert die Kommunikation auf der Sprechakt-Theorie, welches eine Planung der Kommunikation analog zu Aktionen erlaubt (Bradshaw, 1997).

Für die adäquate Anwendung von Agententechnologie hat H.-J. Müller drei Kriterien definiert (Müller, 1997), die für eine geeignete Domäne erfüllt sein müssen. Diese Bedingungen lassen auf einen Emergenzeffekt bei der Anwendung von Multiagentensystemen hoffen. Sie sind charakterisiert durch

- eine *natürliche Verteiltheit*, also das Wiederfinden der verteilten Struktur in der Anwendungsdomäne und nicht eine künstlich erzeugte Verteilung einer zentralen Struktur,
- eine *dynamische Welt*, also eine Domäne, in der strukturelle Änderungen berücksichtigt werden müssen und in der flexibel auf Änderungen reagiert werden muss, und
- eine *komplexe Interaktion*, eine komplexe Koordination zwischen den einzelnen Entitäten.

Im Rahmen von physikalischen Agenten ist eine Mischung der Modellierungsansätze für Agenten von Interesse, die einerseits den Delegationsgedanken verfolgen, und andererseits eine verteilte Problemlösung betreiben (Müller, 1996a; Levesque und Pirri 1999). Erschwerend kommt hinzu, dass physikalische Agenten nicht generell in reaktive oder deliberative Agenten eingeteilt werden können. In kooperativen Umfeldern ist eine Erweiterung der Definition auf „kooperative Agenten“ notwendig, die die Fähigkeit haben, mit anderen Agenten durch Kommunikations-basierte Verhandlung zu kooperieren und sich hierbei im Rahmen eines klar definierten Handlungsspielraums einer beauftragenden Entität bewegen (Kalenka und Jennings, 1997).

Ein Ansatz zur expliziten Integration von bestehenden Systemen („Insellösungen“) wird von Lux vorgeschlagen, die eine interaktive Agentenarchitektur „MEKKA“ eingeführt haben (Lux, 1995). Das Besondere dieser Architektur liegt in der Einführung von drei Ebenen, in denen die Kommunikation, die Steuerung des Agenten und die Einbindung vorhandener Systeme realisiert werden. Andere Agentenarchitekturen fokussieren eher auf den Entscheidungsprozess innerhalb eines Agenten (d’Inverno *et al.*, 1997). Ein gut untersuchter Ansatz in diesem Bereich ist die Verwendung mentaler Kategorien, den *Beliefs*, *Desires* und *Intentions* (BDI: Bratman, 1987; Rao und Georgeff, 1995), die eine Steuerung des Agenten mit formaler Semantik auf der Basis von Temporallogiken ermöglichen (Fagin *et al.*, 1995). Im physikalischen Umfeld ist eine Reaktion in Echtzeit notwendig und so scheint es sinnvoll, auf der einen Seite eine klare und wohlstrukturierte Steuerung, wie den BDI-Ansatz, mit der Integrations- und Interaktionsfähigkeit des MEKKA-Ansatzes auf der anderen Seite zu kombinieren. Eine solche Kombination wird von Timm (2000) eingeführt.

Im Bereich des hier beantragten Projektes sind insbesondere die Ansätze zur Agentensteuerung und -koordination aus dem RoboCup-Umfeld interessant (Veloso *et al.*, 2000). Hier sind einige Ansätze zur Auswahl von Zielen oder Strategien ohne Kommunikation bzw. mit eingeschränkter Kommunikation erarbeitet worden (Tambe, 1997; Andersson und Sandholm, 1998; Jennings, 1993) aber auch zur Adaption von Agenten in dynamischen Umfeldern (Stone und Veloso, 1998a).

Autonome Agenten, die mobil in einer physikalischen Umwelt agieren, müssen über dedizierte räumliche Wissensrepräsentations- und Inferenzmechanismen verfügen, um räumliches Übersichtswissen aufbauen zu können. In einer dynamischen Welt wie dem RoboCup wird Wissen über die Umwelt durch lokale Beobachtungen aus der Perspektive einzelner Agenten gewonnen. Erst mittels räumlicher Inferenzen, in die u. U. auch Standardannahmen eingehen, lassen sich die unsicheren und unvollständigen Einzelbeobachtungen zu einem Ganzen integrieren. Die KI-Forschung zum räumlichen Schließen (Übersicht bei Cohn, 1997) hat hier einschlägige Vorarbeiten geleistet, in denen sie Repräsentationsformalismen für unterschiedliche Arten räumlichen Wissens bereitstellt. Man unterscheidet nach dem Grad der Bestimmtheit topologisches, ordinales und metrisches Wissen. Zu jeder dieser drei Abstraktionsstufen sind verschiedene Kalküle entwickelt worden, die zumeist auf relationalen Algebren beruhen und als Inferenzmechanismus Constraint-Löser verwenden, die globale Konsistenz durch lokale Konsistenz (z. B. Pfadkonsistenz) approximieren. Kalküle dieser Art entwickelten u. a. Egenhofer und Franzosa (1991), Freksa (1992), Randell, Cohn und Cui (1992), Zimmermann (1993), Clementini, Di Felice und Hernández (1997) sowie Schlieder (siehe Abschnitt 2.2).

### **2.1.2 Bewegungsdetektion**

Um die Strategie anderer Agenten (z. B. des Gegners im RoboCup) erkennen zu können, muss ein System in der Lage sein, die Aktionen dieser Opponenten zu erfassen. Im Bereich Robotik bedeutet dies in erster Linie, dass die Bewegungen dieser Agenten oder auch der von ihnen manipulierten Objekte (z. B. der Ball im RoboCup) detektiert werden müssen.

Die Bewegungsdetektion war bisher eine Domäne der Bildverarbeitung. Es existieren unzählige Arbeiten zur Bestimmung der Eigenbewegung (z. B. Aloimonos und Duric, 1992), aber auch zur Detektion von Objektbewegungen (z. B. Denzler und Niemann, 1995). Aggarwal und Nandhakumar (1988) haben ältere Arbeiten zusammengefasst; Herwig (1996) zählt einige neuere Ansätze auf. Man kann zwischen korrelationsbasierten und differentiellen Verfahren unterscheiden, wobei erstere nach ähnlichen Bildregionen in jeweils zwei Bildern suchen, während letztere die Bewegung durch Differenzbildung zwischen den einzelnen Pixeln mehrerer Bilder ermitteln, was eine zeitgleiche oder nahezu zeitgleiche Aufnahme der Bilder voraussetzt. Diese Methoden basieren auf der Annahme, dass die Helligkeit der einzelnen Objekte in allen Bildern konstant ist, was selbst bei gleichzeitig, aber aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommenen Bildern nicht immer gegeben ist. Aber auch die Korrelationsverfahren sind stark von der Beleuchtung abhängig.

Eine eher neuere Entwicklung ist der Einsatz von Laser-basierten Entfernungssensoren, sogenannten Laserscannern. Diese wurden im Wesentlichen zur Generierung von Karten eingesetzt (z.B. von Edlinger und Weiß, 1995), aber auch zur Bestimmung der Eigenbewegung (Weiß *et al.*, 1994). Teilweise werden statt Laserstrahlen auch Radarstrahlen verwendet, die eine wesentlich größere Reichweite haben (Rozmann und Detlefsen, 1995).

Bei allen Anwendungen muss das Problem des *Scan Matching* gelöst werden, bei dem - ähnlich der Stereo-Bildverarbeitung - ermittelt wird, welcher Messpunkt aus einem Laserscan mit welchem aus einem zweiten Scan korreliert. Cox (1991) löst dieses Problem, indem die Punkte beider Scans zuerst zu Segmenten von Geraden zusammengefasst werden und dann die Geraden beider Bilder zur Deckung gebracht werden. Dies setzt allerdings voraus, dass ausreichend viele gerade Flächen in der Umgebung vorkommen. Weiß und Puttkamer (1995) rechnen die beiden Scans erst in Winkelhistogramme um und bestimmen mit Hilfe einer Kreuzkorrelation deren Rotation zueinander. Danach verwenden sie x- und y-Histogramme und entsprechende Korrelationen, um den Versatz zwischen beiden Scans zu ermitteln. Auch dieses Verfahren bedingt eine Umgebung mit geraden

Flächen. Lu (1995) und Lu und Miliotis (1997) hingegen setzen mit ihrem *idc*-Algorithmus auf eine direkte Punkt-zu-Punkt-Zuordnung zwischen den Scanpunkten, wodurch auf eine strukturierte Umgebung verzichtet werden kann. Allerdings ist die Lösung sehr zeitaufwendig, so dass Gutmann und Schlegel (1996) sie mit dem Ansatz von Cox (1991) kombiniert haben. Ein Ergebnis dieser Arbeit ist der Algorithmus zum Erzeugen von Karten aus Laserscans von Gutmann und Nebel (1997), dessen Ziel interessanterweise die Generierung einer topologischen Karte ist; als Nebenprodukt fällt aber eine metrische Karte ab.

Alle Scan-Matching-Verfahren gehen von einer statischen Umwelt aus, dienen also nur der Erfassung der Eigenbewegung des Agenten. Allerdings können sie die Grundlage für eine Erkennung von Fremdbewegungen sein, da sie alle Zuordnungen von räumlichen Objekten in aufeinander folgenden Scans bestimmen. Isoliert man erst einzelne, zusammenhängende Gruppen von Messpunkten (also Objekte), können auch diese mit den Verfahren verfolgt werden.

Ein eher klassischer Ansatz der Bewegungsbestimmung ist das Verfolgen von Objekten durch Deckenkameras. Dies wird z. B. in der Small-Size-Liga beim RoboCup eingesetzt (RoboCup Federation, 2000). Hierbei ist insbesondere dann eine hohe Genauigkeit zu erreichen, wenn sich auf den verfolgten Einheiten aktive optische Elemente befinden (z. B. LEDs), die zu bestimmten Zeitpunkten ein- bzw. ausgeschaltet werden können, um die Verwechslung zwischen verschiedenen Objekten auszuschließen.

### 2.1.3 Literatur

- Aggarwal, J. K., Nandhakumar, N. (1988). On the computation of motion from sequences of images - a review. In: *Proc. of the IEEE* 76. 917-935.
- Aloimonos, Y., Duric, Z. (1992). Active Egomotion Estimation: A Qualitative Approach. Sandini, G. (Ed.): *Proc. 2<sup>nd</sup> European Conf. on Computer Vision (ECCV)*. Lecture Notes in Computer Science 588. Springer. 497-510.
- Andersson, M.; Sandholm, T. (1998): Leveled Commitment Contracting among Myopic Individually Rational Agents. In: *Proc. 3rd Int. Conference on Multiagent Systems (ICMAS-98)*, Paris, France.
- Axelrod, R. (1997): *The Complexity of Cooperation - Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton.
- Bratman, M. E. (1987). *Intentions, Plans and Practical Reason*. Harvard University Press. Cambridge, MA.
- Brenner, W.; Zarnekow, R. Wittig, H. (1998). *Intelligente Softwareagenten – Grundlagen und Anwendungen*. Springer. Berlin.
- Bullheimer, B., Hartl, R. F.; Strauss, C. (1997). Applying the Ant System to the Vehicle Routing Problem. In: *Proceedings der 2<sup>nd</sup> Metaheuristic International Conference*, Sophia-Antipolis, France.
- Clementini, E., Di Felice, P., Hernández, D. (1997). Qualitative representation of positional information. *Artificial Intelligence*, 95, 317-356.
- Cohn, T. (1997). Qualitative spatial representation and reasoning techniques. In: G. Brewka, C. Habel, B. Nebel (Eds.): *Proceedings KI-97: Advances in Artificial Intelligence*. Berlin. Springer. 1-30.
- Conen, W., Neumann, G. (1998). *Coordination Technology for Collaborative Applications*. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1364, Springer Verlag. Berlin.
- Cox, I. (1991). Blanche - an Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 7:2. 193-204

- Denzler, J., Niemann, H. (1995). Combination of Simple Vision Modules for Robust Real-Time Motion Tracking. In: *European Transactions on Telecommunications* 6:3.
- Edlinger, Th., Weiß, G. (1995). Exploration, Navigation and Self-Localization in an Autonomous Mobile Robot. In: Dillmann, R., Rembold, U., Lüth, T. (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme* 11. Informatik aktuell. Springer. Berlin, Heidelberg, New York. 142-151.
- Egenhofer, M., Franzosa, R. (1991). Point-set topological spatial realtions. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5, 161-174.
- Elfes, A. (1991). Occupancy Grids: A Stochastic Spatial Representation for Active Robot Perception. In: Iyengar, S. S., Elfes, A. (Eds.): *Autonomous Mobile Robots*. IEEE Computer Society Press. Los Alamitos, California. 60-70.
- Etzioni, O., Weld, D. (1994). A Softbot-Based Interface to the Internet. In: *Communication of the ACM* 37:7. 44-49.
- Fagin, R.; Halpern, J. Y.; Moses, Y; Vardi, M. Y. (1995). Reasoning About Knowledge. The MIT Press. Cambridge, MA.
- Faratin, P.; Sierra, C.; Jennings, N. R. (1998). Negotiation Decision Functions for Autonomous Agents. In: *International Journal of Robotics and Autonomous Systems* 24:3-4. 159-182.
- Ferber, J. (1999). Multi-Agent Systems – An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison-Wesley. New York.
- Freksa, C. (1992). Temporal reasoning based on semi-intervals. *Artificial Intelligence* 54, 199-227.
- Gambardella, L.M.; Taillard, E.; Agazzi, G. (1999). MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System For Vehicle Routing Problems With Time Windows. In: *Technical Report IDSIA*, IDSIA-06-1999, Lugano, Switzerland.
- Gutmann, J.-S., Nebel, B. (1997). Navigation mobiler Roboter mit Laserscans. In: *Autonome Mobile Systeme* 13. Informatik aktuell. Springer. Berlin, Heidelberg, New York.
- Gutmann, J.-S., Schlegel, C. (1996). AMOS: Comparison of Scan Matching Approaches for Self-Localization in Indoor Environments. In: *1<sup>st</sup> Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robots (Eurobot)*.
- Haddadi, A. (1996). Communication and Cooperation in Agent Systems. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1056. Springer. Berlin.
- Herwig, Ch. (1996). Visual Motion Processing for Active Observers. Ph.D. thesis. In: Krieg-Brückner, B., Roth, G., Schwegler, H. (Hrsg.): *ZKW-Bericht* 1/96. ISSN 0947-0204. Zentrum für Kognitionswissenschaften. Universität Bremen.
- Hong, M. L., Loo, K. P. (1998). Simulation of Flocking Behavior among Situated Mobile Robots. In: Zobel, R., Moeller, Dietmar (Eds.): *Simulation-Past, Present and Future*. Society for Computer Simulation International. 395-399.
- d'Inverno, M.; Fisher, M.; Lonusio, A.; Luck, M.; de Rijke, M.; Ryan, M. Wooldridge, M. (1997). Formalisms for Multi-Agent Systems. In: *The Knowledge Engineering Review* 12(3).
- Jennings, N. (1993). Controlling Cooperative Problem Solving using Joint Intentions In: *AI Communications* 6:3-4, 247-248.
- Jennings, N. R. (1992). A Knowledge Level Approach to Collaborative Problem Solving. In: *Proc. AAAI Workshop on Cooperation Among Heterogeneous Intelligent Agents*, San Jose, USA, pp. 55-64.
- Jennings, N. R.; Lesperance, Y. (Eds.) (2000). Intelligent Agents VI – Agent Theories, Architectures, and Languages. Springer. Berlin.
- Jennings, N.R.; Wooldridge, M.J. (1998). Agent Technology: Foundation, Applications, and Markets. Springer. New York.
- Kalenka, S.; Jennings, N. R. (1997). Responsible Decision Making by Autonomous Agents. In: *ICCS-97*.

- Kaufman, K. A.; Michalski, R. S. (1999). Learning from Inconsistent and Noisy Data: The AQ18 Approach. In: *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems*. Warsaw.
- Klusch, M.; Kaerschberg, L. (Eds.) (2000). Cooperative Information Agents IV – The Future of Information Agents in Cyberspace. Springer. Berlin.
- Levesque, H. J.; Pirri, F. (Eds.) (1999). Logical Foundation for Cognitive Agents. Springer: Berlin.
- Lu, F. (1995). Shape Registration Using Optimization for Mobile Robot Navigation. Ph. D. thesis. University of Toronto.
- Lu, F., Milius, E. (1997). Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 18:3. 249-275.
- Luck, M.; d'Inverno, M. (1995). A Formal Framework for Agency and Autonomy. In: *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems*, pp.254-260, AAAI Press/MIT Press.
- Lux, A. (1995). Kooperationen Mensch-Maschine Arbeit - Ein Modellierungsansatz und dessen Umsetzung im Rahmen des Systems MEKKA. Dissertation, Technische Fakultät der Universität des Saarlandes: Saarbrücken.
- Maes, P. (1994). Agents that Reduce Work and Information Overload. *Communications of the ACM* 37:7. ACM Press. 31-40, 146.
- Mataric, M. (1997). Behavior-Based Control: Examples from Navigation, Learning, and Group Behavior. In: Hexmoor, Horsewill, Kortenkamp (Eds.): *Journal of Experimental and Artificial Intelligence*. Special Issue on Software Architectures for Physical Agents. Vol. 9:2-3.
- Müller, H.-J. (1993). Verteilte Künstliche Intelligenz – Methoden und Anwendungen. BI Wissenschaftsverlag. Mannheim.
- Müller, H.-J. (1997). Towards Agent Systems Engineering. *International Journal on Data and Knowledge Engineering*, Special Issue on Distributed Expertise 23. 217-245.
- Müller, J.P. (1996a). The Design of Intelligent Agents. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* 1177, Springer. Berlin.
- Ossowski, S. (1999). Co-Ordination in Artificial Agent Societies. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* 1535, Springer. Berlin.
- Quinlan, J. R. (1993). C4.5 Programs for Machine Learning. Morgan Kaufmann.
- Raines, T., Tambe, M., Marsella, S. (2000). Automated Assistants to Aid Humans in Understanding Team Behaviors. Paper presented at the 4<sup>th</sup> *International Conference on Autonomous Agents (Agents 2000)*, Barcelona, Spain.
- Randell, D., Cui, Z., Cohn, A. (1992). A spatial logic based on regions and connection. In *Proc. Int. Conf. On Knowledge Representation*. 165-176.
- Rao, A. S.; Georgeff, M. P. (1995). BDI Agents: From Theory to Practice. In: *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95)*, San Francisco, USA.
- RoboCup Federation (2000). RoboCup F-180 League Rules. State May, 20 2000. <http://parrotfish.coral.cs.cmu.edu/robocup-small/rules/>. Paragraph 9.
- Rosenschein, J.S.; Zlotkin, G. (1994). Rules of Encounter - Designing Conventions for Automated Negotiation among Computers, Cambridge.
- Rozmann, M., Detlefsen, J. (1995). Radarsensorbasierte Kartenerstellung in Innenräumen für Navigationsaufgaben In: Dillmann, R., Rembold, U., Lüth, T. (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme* 11. Informatik aktuell. Springer. Berlin, Heidelberg, New York. 213-219.
- Russell, S. J.; Norvig, P. (1995). Artificial Intelligence – A Modern Approach. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, New Jersey.
- Stone, P. (2000). Layered Learning in Multiagent Systems: A Winning Approach to Robotic Soccer. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

- Stone, P., Veloso, M. (1999). Team-Partitioned, Opaque-Transition Reinforcement Learning. Paper presented at the Robot Soccer World Cup II.
- Stone, P., Veloso, M. (1998a). A Layered Approach to Learning Client Behaviors in the RoboCup Soccer Server. In: *Applied Artificial Intelligence*, 12:3. 165-188.
- Stone, P., Veloso, M. (1998b). Towards Collaborative and Adversarial Learning: A Case Study in Robotic Soccer. In: *International Journal of Human-Computer Studies*. 48.
- Tambe, M. (1997). Agent Architectures for Flexible, Practical Teamwork. In: *Proc. National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-97)*.
- Veloso, M.; Pagello, E.; Kitano, H. (Eds.) (2000). RoboCup-99: Robot Soccer World Cup III. In: *Proceedings of the RoboCup-99 workshop*. Stockholm. Springer.
- Weiß, G. (1999). Multiagent Systems – A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. The MIT Press: Cambridge, Massachusetts.
- Weiß, G., v. Puttkamer, E. (1995). A Map Based on Laserscans without Geometric Interpretation. In: *Intelligent Autonomous Systems*. IOS Press. 403-407.
- Weiß, G., Wetzler, C., v. Puttkamer, E. (1994). Positions- und Orientierungsbestimmung von bewegten Systemen in Gebäuden durch Korrelation von Laserradardaten. In: *Autonome Mobile Systeme* 10. Fachgespräch. Stuttgart. 55-64.
- Wooldridge, M.J., Jennings, N.R. (1995). Agent Theories, Architectures and Languages: A Survey. In: Wooldridge, M.J.; Jennings, N.R.: *Intelligent Agents*. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 890. Springer. Berlin.
- Zlotkin, G.; Rosenschein, J. S. (1989). Negotiation and Task Sharing Among Autonomous Agents in Cooperative Domains. In: *IJCAI-89*. 912-917.

## 2.2 Eigene Vorarbeiten

### 2.2.1 Intelligente Systeme

Im Bereich Intelligente Systeme des Technologie-Zentrums Informatik (TZI) wird seit 1995 intensiv auf dem Gebiet der Agententechnologien geforscht. Ziel der Forschungsarbeiten ist die Entwicklung von systematischen Grundlagen für den Entwurf und die Anwendung von Agentensystemen, wobei wesentliche Forschungsanstöße aus der Entwicklung von interdisziplinären Anwendungsszenarien gezogen werden. Im folgenden werden auf der einen Seite grundlegende Forschungsarbeiten zur Weiterentwicklung der Agententechnologie und auf der anderen Seite Arbeiten im Bereich der anwendungsorientierten Forschung vorgestellt.

**Weiterentwicklung grundlegender Techniken für Agentensysteme.** Neben der thematischen Einordnung von Begriffen und Techniken aus der Verteilten Künstlichen Intelligenz in (Müller, 1996b, c) wurde untersucht, wie Methoden aus Soziologie, Organisationslehre und Lerntheorie für die Entwicklung von Multiagentensystemen genutzt werden können. Dabei wurde insbesondere daran mitgearbeitet, einen neuen Forschungszweig (Sozionik) im Schnittpunkt der Soziologie und der Verteilten Künstlichen Intelligenz zu etablieren, vgl. den Forschungsschwerpunkt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Malsch, 1998; Haugeneder, 1996).

Detaillierte Weiterentwicklungen für Agentensysteme gab es insbesondere in den Bereichen alternativer Techniken zur Unterstützung der Koordinationsmethoden in Multiagentensystemen und für die Modellierung verteilter Prozesse. Durch die explizite Modellierung von Konflikten wurde es möglich, dass Agenten konflikträchtige Situationen erkennen und durch geeignete Maßnahmen dem Konfliktfall entgegen wirken. Insbesondere wurde eine neue Methode gefunden, die nicht wie üblich die lokalen Präferenzen anpasst, um einen potentiellen Konflikt aufzulösen, vielmehr wird der Konfliktgegenstand so verändert, dass er den lokalen Präferenzen und Prioritäten genügt (Her-

zog *et al.*, 1998; Ranze *et al.*, 1998; Joeris *et al.*, 1997a, b). Derzeit wird ein Ansatz zur Steuerung von Agenten auf der Basis von Konflikten entwickelt, der im Rahmen einer neuen Agentenarchitektur eingesetzt wird. Diese unterstützt eine explizite Balancierung deliberativen und reaktiven Verhaltens, welches besonders im Bereich autonom kooperativer Agenten entscheidend ist. Die Agentenarchitektur ermöglicht ferner die Interaktion in heterogenen Umfeldern auf Basis offener und adaptiver Kommunikationsprotokolle (Timm, 2000).

Einschlägige Vorarbeiten existieren außerdem im Bereich des räumlichen Schließens, der für eine robuste und effiziente Informationsverarbeitung in mobiler Agenten von besonderer Bedeutung ist.

Ein wichtiger Beitrag zu diesem Gebiet besteht in der Einführung und Analyse einer neuen Abstraktionsebene der räumlichen Repräsentation: die Ebene der Verarbeitung ordinaler Information (in verschiedenen Teilaspekten ausgeführt in Schlieder, 1993, 1995, 1996a, 1996b). Ordinale Information, man spricht auch von Anordnungsinformation, nimmt, was den Grad an Bestimmtheit betrifft, eine Mittelstellung zwischen topologischer und metrischer Information ein. Aussagen über die Konvexität von Punktmengen vermitteln beispielsweise ordinale Information. Die früher üblichen topologisch-metrischen Repräsentationsansätze mussten solche Information entweder unter-spezifisch, d.h. topologisch, oder aber überspezifisch, d.h. metrisch, enkodieren, weshalb sich inzwischen das in den genannten Arbeiten eingeführte dreiteilige Schema topologisch-ordinal-metrisch durchgesetzt hat. Dabei hat sich insbesondere die Enkodierung ordinaler Information durch die Panoramarepräsentation bewährt, was Anwendungen bei der Roboternavigation (De-Rougemont und Schlieder, 1997), in Geoinformationssystemen (Schlieder, 1996a) und Bilddatenbanken (Schlieder, 1996b), belegen. Ebenfalls von Bedeutung im Projektkontext ist die Beschreibung räumlicher Lage durch relationale Karten bzw. diagrammatische Repräsentationen (Schlieder, 1998; Schlieder und Hagen, 2000).

**Interdisziplinäre Anwendungsszenarien.** Der Bereich der anwendungsorientierten Forschung konzentriert sich auf die Bereiche Produktion, Logistik und Umwelt (Timm, 1998; Eschenbächer *et al.*, 2000; Holsten, 1998; Timm *et al.*, 1999a).

Ein wesentliches Anwendungsfeld stellt die überbetriebliche Informationslogistik und die ökologische Produktions- und Transportlogistik dar, d. h. die Organisation betrieblicher Abläufe und Materialflüsse unter umweltrelevanten Optimierungskriterien sowohl in „realen“ Unternehmensverbänden wie auch in „virtuellen“ Unternehmungen. Die TZI-Forschungsgruppe ist auf diesen Gebieten mit mehreren Forschungsprojekten (s. u.) am interdisziplinären Forschungsverbund Logistik (FoLo) in der Universität Bremen beteiligt. Einer der Forschungsgegenstände ist die Unterstützung der Kommunikation, Koordination und Kooperation in virtuellen Unternehmen durch hierarchische rekursive Agentenstrukturen, da unternehmensübergreifende Geschäftsbeziehungen in einem Logistik-Netzwerk eine weitreichende Unterstützung zur Koordinierung und Kooperation benötigen, um die Integration und Koordination der nötigen Logistikprozesse sicherzustellen. Auf dieser Grundlage kann dann eine Optimierung der Kooperationsbeziehungen und die Realisierung intelligenter Kooperationsmechanismen für den Datenaustausch (Knirsch und Timm, 1999b) erfolgen.

Die ökologische Produktions- und Transportlogistik stellt höchste Ansprüche an die computerunterstützte Planung und Abwicklung von Produktionsprozessen, da die darin enthaltenen Probleme hochgradig diversifiziert, komplex und verteilt sind. Es gilt dabei, räumlich verteilte Produktionsstätten zu planen, die Materialflüsse zwischen ihnen zu optimieren und das Gesamtsystem zu simulieren. Die globale Optimierung der Kooperationsbeziehungen und die Realisierung intelligenter Kooperationsmechanismen für den Datenaustausch sind dabei von besonderer Bedeutung, z.B. auch für die automatische Verhandlung von Transportdienstleistungen innerhalb einer Allianz mit

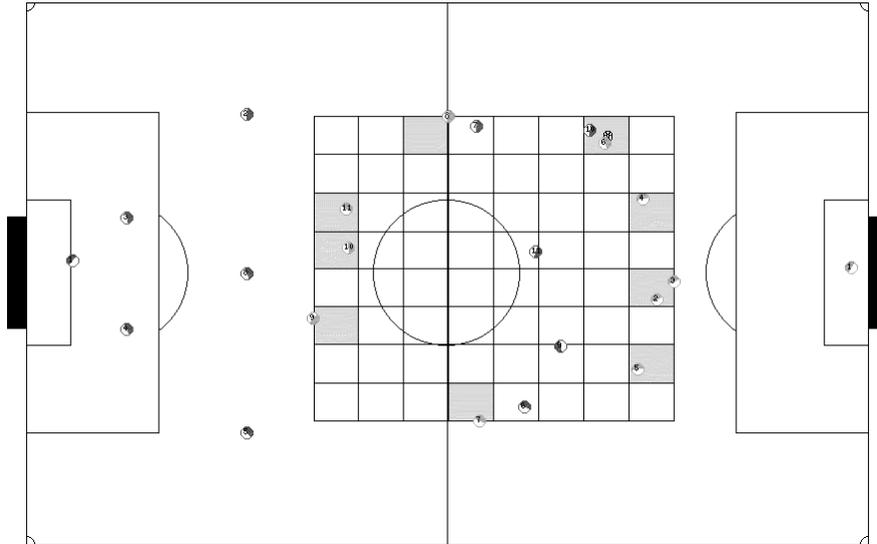


Abbildung 1: Das Gitter zur Erfassung der Spielsituation

Hilfe „offener“ Kommunikationsprotokolle, deren Ziel die ökologisch sinnvolle Gestaltung von Transporten ist (Timm *et al.*, 1998; Bousonville *et al.*, 1999; Timm und Knirsch 1999).

Es konnte gezeigt werden, dass die inhärente Verteiltheit der Probleme in diesen Anwendungsbereichen effektiv ausgenutzt werden kann, indem die natürlich vorkommenden Entitäten als autonom operierende, kooperative Agenten modelliert werden (Knirsch und Timm, 1999b). Das heißt insbesondere, dass die Problemlösung nicht auf einen zentralistischen Lösungsansatz (künstlich) abgebildet werden muss. Dies führte beispielsweise dazu, dass die nicht mehr handhabbare Komplexität bei der Modellierung einer Produktionssteuerung durch Petri-Netze mit Hilfe der Selbstorganisation kooperativer Produktionsagenten erheblich vereinfacht werden konnte (Timm, 1998).

Die Entwicklung der Agententechnologie in der Betriebswirtschaft ist nicht nur von besonderem Interesse, sondern auch die Nutzung betriebswirtschaftlicher Theorien zur Weiterentwicklung der Agententechnologie. Daher wurde mitgeholfen, ein Schwerpunktprogramm bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft zu initiieren („Intelligente Softwareagenten in betriebswirtschaftlichen Anwendungen“) und es wurden Workshops zu diesem Thema organisiert (KI-99 WS03, ECAI-00 WS 13: Timm *et al.*, 1999b; Timm *et al.*, 2000).

### 2.2.2 Virtual Werder

Virtual Werder stellt die Brücke zwischen aktueller Forschung im TZI und der Vermittlung von Wissen im Bereich KI an Studenten dar. Hier wurde im Rahmen einer der Lehrveranstaltungen Künstlichem Intelligenz I+II sowie eines anschließenden, unabhängigen Forschungsprojekts ein Multiagentensystem für die Simulationsliga des RoboCup unter Leitung von Dr. Visser entwickelt. Diese Mannschaft hat sich in diesem Jahr zur Weltmeisterschaft 2000 qualifiziert.

Nach einem Experteninterview mit Thomas Schaaf, dem Trainer der Bundesligamannschaft SV Werder Bremen, wurde deutlich, dass es sinnvoll ist, das gegnerische Spielsystem und damit die generelle Strategie zu analysieren und daraufhin entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Im Rahmen des Projekts wurde das Spielverhalten gegnerischer Teams auf Basis von Log-Dateien vergangener Spiele aus den Weltmeisterschaften 1999 und 1998 analysiert.

Ähnliche Ansätze wurden von verschiedenen Forschergruppen in den letzten Jahren verfolgt. Sie beziehen sich auf das Lernen von Teamverhalten in der Simulations- und Middle-Size-League (vgl. Stone und Veloso, 1998a, 1998b, 1999; Stone, 2000). Raines *et al.* (2000) beschreiben einen neuen Ansatz um digitale Assistenten zu automatisieren, die außen stehenden Beobachtern helfen sollen, Teamverhalten in der Simulationsliga zu verstehen. Diese Ansätze ist allerdings dazu gedacht, Spiele offline, d. h. nach dem Abpfiff zu analysieren, um neue Erkenntnisse für die nächsten Aufgaben zu gewinnen. Frank *et al.* (2000) präsentieren einen Real-Time Ansatz, der auf statistischen Verfahren beruht. Hier wird auch eher eine Teambewertung vorgenommen als ein Erkennen von Strategien.

Der Ansatz bei Virtual Werder hingegen ist etwas anders: Hier wird der seit 1998 zugelassene (aber bis dato noch nicht eingesetzte) Online-Coach eingesetzt, um das Spielsystem des Gegners zu erkennen und geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Dazu wurden 16 Spielsysteme untersucht, die auch in der Praxis gespielt werden. Diese Spielsysteme (z. B. Catenaccio) bilden die Ausgaben eines künstlichen neuronalen Netzes, das als Eingabe die Positionen der gegnerischen Spieler erhält (s. Abb. 1). Zunächst werden die Positionen der gegnerischen Spieler, die am weitesten links, rechts, oben und unten stehen, bestimmt. Diese Spieler bilden die äußere Umrandung der *Bounding Box*. Diese Box wird dann in 8x8 gleichmäßige Zellen unterteilt. Jetzt wird bestimmt, in welchen Zellen gegnerische Spieler stehen und zwar unabhängig davon, wie viele Spieler in einer Zelle stehen. Dieser Vektor von insgesamt 64 Eingabensvariablen wird an ein neuronales Netz angelegt. Um diese Analyse erfolgreich durchzuführen, wurden über 700 Beispiele mit dem Netz trainiert und der Lernerfolg überwacht. Mit diesem „Wissen“ ist es dem Online-Coach nun möglich, bei Spielunterbrechungen, also beispielsweise bei Einwürfen, den Spielern Kommandos zuzurufen. Die Spieler reagieren auf solche Kommandos mit einer Positions- oder Taktikänderung. Drücker *et al.* (2000) haben gezeigt, dass dieser Ansatz signifikante Verbesserungen während des Spieles bringen kann. Der Vorteil liegt u. a. darin, dass der Coach seinen Spielern in Echtzeit Kommandos zur Gegenstrategie geben kann (Visser *et al.*, 2001)

### 2.2.3 Kognitive Robotik

Im Bremer Institut für Sichere Systeme wird seit ca. sechs Jahren an der Entwicklung eines intelligenten Transportmittels für behinderte und ältere Menschen - dem *Bremer Autonomen Rollstuhl „Rolland“* (s. Abb. 2) gearbeitet. Der mit Sensorik und Steuer-PC ausgestattete Elektro-Rollstuhl Meyra Genius 1.522 dient sowohl als wissenschaftliche Experimentierplattform im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Raumkognition“, als auch als Demonstrator für den Einsatz formaler Methoden bei der Entwicklung eingebetteter Systeme. Verhandlungen über einen kommerziellen Einsatz von Rolland mit Fahrassistent laufen mit der Firma Meyra.

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Anwendungen zur Unterstützung behinderter Menschen für unterschiedliche Szenarien erstellt sowie generelle Verfahren zur Navigation entwickelt:

**Der Fahrassistent** erlaubt die Steuerung mit dem serienmäßig vorhandenen Joystick und unterstützt den Benutzer in bestimmten Situationen bei der Handhabung des Rollstuhls. Er sorgt für sanftes Beschleunigen und Abbremsen, passt die Geschwindigkeit des Fahrzeugs an die aktuelle Situation an (Lankenau und Meyer, 1998) und weicht Hindernissen aus (Röfer und Lankenau, 1998; Lankenau und Röfer, 1998). Hierbei behält der Benutzer weitgehend die Kontrolle über das System. Um dies zu erreichen, analysiert der Rollstuhl die Kommandos seines Fahrers und deren Bezug zur Umgebung, um die von ihm *gewünschte* Aktion zu ermitteln, d. h. um z. B. festzustellen, ob einem erkannten Hindernis nach links, rechts oder gar nicht ausgewichen werden soll (Rö-

fer und Lankenau, 1999a, b). Zusätzlich gibt es vollautomatische Manöver für das Wenden (Lankenau und Röfer, 2000c) und das Einbiegen in eine Tür.

**Routennavigation mit Wegmarken.** Auf dem Vorgänger von Rolland (ebenfalls ein Meyra-Rollstuhl) wurde ein Navigationsverfahren entwickelt, mit dem ein autonomes System das Abfahren einer Route durch eine Trainingsfahrt lernen kann. Die Route wird dabei als eine Folge von sog. Grundverhalten, wie z. B. Wandverfolgung, beschrieben, die an bestimmten Stellen des Weges aktiviert werden. Das Verfahren assoziiert die Aktivierungspunkte der Verhalten mit künstlichen Wegmarken, die von einer Kamera erfasst und durch ein Bildverarbeitungsverfahren erkannt werden (Röfer, 1998a; Röfer und Müller, 1998; Krieg-Brückner et al., 1998). Ausgestattet mit dieser Wegbeschreibung kann der Rollstuhl der Route danach auch autonom folgen, indem er nach dem Erkennen der entsprechenden Wegmarken das ihnen zugeordnete Verhalten startet. Alternativ kann die Selbstlokalisierung statt durch Erkennung von Landmarken auch durch die Analyse der Bewegung des Rollstuhls erfolgen (Röfer, 1998c, 1999, Musto et al., 1999, 2000).



Abbildung 2. Der Bremer Autonome Rollstuhl „Rolland“

**Routenassistent.** Während sich der Fahrassistent an Benutzer richtet, die Hilfe bei der präzisen Steuerung eines Rollstuhls benötigen, mit der eigentlichen Navigation aber keine Probleme haben, existiert auch der umgekehrte Fall, in dem eine Person körperlich und geistig in der Lage ist, einen Rollstuhl völlig eigenständig zu steuern, aber große Schwierigkeiten mit der Orientierung hat. Dies gilt z.B. für Amnestiker, die sich einerseits weder Wege merken können noch Personen wiedererkennen, mit denen sie täglich umgehen, andererseits allerdings keine Schwierigkeiten mit prozeduralen Aufgaben wie der Benutzung eines Fahrrads oder eines Rollstuhls haben. In Zusammenarbeit mit dem Zentralkrankenhaus Bremen-Ost wurde daher begonnen, einen sog. Routenassistenten zu entwickeln, der das Abfahren längerer Wege unterstützt, indem er z. B. anzeigt, in welche Richtung der Benutzer als Nächstes abbiegen soll. Ein alternativer Ansatz, solche Patienten zu unterstützen, besteht darin, dass der Rollstuhl eine Routenbeschreibung erhält, nach der er selbstständig seinen Weg findet (Müller et al., 2000). Die Beschreibung besteht aus qualitativen Längen und Richtungen sowie aus Wegmarken und soll zukünftig in verbaler Form eingegeben werden können.

**Metrische Selbstlokalisierung.** Im Rahmen von Diplomarbeiten wurden zwei Verfahren zur metrischen Selbstlokalisierung auf dem Bremer Autonomen Rollstuhl implementiert. Zum einen das ursprünglich von Elfes (1991) entwickelte Verfahren zur Positionsbestimmung mit Wahrscheinlichkeitsgittern (Mädl und Tietgens, 1999), zum anderen ein auf Edlinger und Weiß aufbauender Ansatz zur Erzeugung und Nutzung von Laserscankarten, der gegenüber der ursprünglichen Fassung stark erweitert wurde (Kollmann und Röfer, 2000).

**SimRobot.** Beim Aufbau des Bremer Autonomen Rollstuhls wurde der am Bremer Institut für Sichere Systeme entstandene Robotersimulator SimRobot (Siems et al., 1994) eingesetzt und so erweitert, dass für beide vorhandenen Rollstühle jeweils direkt zwischen der Simulation und den

realen Systemen gewechselt werden kann (Röfer, 1998b). Dieses hat sich als leistungsfähiges und zeitsparendes Konzept bei der Entwicklung erwiesen.

Außerdem protokolliert der reale Rollstuhl während der Fahrt alle Sensordaten. Diese Protokolle können in der Simulation wiedergegeben werden, z. B. um während der Fahrt aufgetretene Probleme näher zu analysieren oder neue Verfahren mit realistischen Sensordaten zu testen. Somit wird der simulierte Rollstuhl dann mit realen Daten versorgt.

**Modellierung der Navigation.** Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Raumkognition“ wurde von Krieg-Brückner in Kooperation mit anderen Teilprojekten eine Taxonomie der Navigation sowie eine allgemeine Modellierung räumlichen Wissens für die Navigation erarbeitet, die gleichermaßen auf Tiere, Menschen und künstliche Agenten anwendbar ist (Krieg-Brückner *et al.*, 1998; Werner *et al.*, 1997, 2000). Sie ist eher auf den einzelnen Agenten und die statischen Aspekte der Umgebung ausgelegt; es wird zu prüfen sein, inwieweit sie für Multiagentensysteme tauglich ist.

### 2.3 Veröffentlichungen der letzten fünf Jahre

- Bousonville, T.; Knirsch, P.; Timm, I.J. (1999). Einsatz von Graphregel-basierten Agenten zur flexiblen Modellierung von Tourenplanungsproblemen. In: *Proceedings des Workshops „Agententechnologie“ im Rahmen der 23. Jahrestagung für Künstliche Intelligenz*, TZI Bericht 16, Bremen.
- De Rougemont, M., Schlieder, C. (1997). Spatial navigation with uncertain navigation. In: *Proc. 14<sup>th</sup> National Conference on Artificial Intelligence*. 649-554.
- Drücker, C.; Hübner, S.; Schmidt, E.; Visser, U.; Weland, H.-G. (2000). Virtual Werder: Using the Online-Couch to Team Formations. In: Balch, T., Stone, P., Kraetschmar, G. (Eds.): *4<sup>th</sup> International Workshop on RoboCup*. Carnegie Mellon University Press, Melbourne, Australia, 2000. 217-222.
- Eschenbächer, J., Knirsch, P., Timm, I.J. (2000). Demand Chain Optimization by Using Agent Technology. In: *Proceedings of IFIP WG 5.7 Conference*. Tromsø, Norway.
- Haugeneder, H., Kraetschmar, G., Müller, H.J., Weiß, G., Wrobel, S. (Hrsg.)(1996). Lernen, Adaption und Selbstorganisation in verteilten intelligenten Systemen. *Forschungsbericht FK1-217-96*, Institut für Informatik, Technische Universität München.
- Herzog, O., Moini, A., Hewitt, C., Hofkin, R. (1998). Negotiation-Based Cooperation In Multi-Agent Systems. In: *Software Productivity Consortium, Herndon, Va., SPC-98050-CMC*.
- Joeris, G., Klauck, Ch., Herzog, O. (1997a). Dynamical and Distributed Process Management based on Agent Technology. In: *Proc. 6<sup>th</sup> Scandinavian Conference on Artificial Intelligence (SCAI'97)*, August '97, Helsinki, Finland.
- Joeris, G., Klauck, Ch., Wache, H. (1997b). A Flexible Agent-Based Framework for Process Management. In: *Proc. of the 3rd Knowledge Engineering Forum*, 10-11 April '97, Kaiserslautern, Germany.
- Knirsch, P., Timm, I. J. (1999a). Adaptive Multiagent Systems Applied on Temporal Logistics Networks. In: *Proceedings 4<sup>th</sup> International Symposium on Logistics (ISL-99)*. Florence, Italy.
- Knirsch, P., Timm, I. J. (1999b). Multi-Agentensysteme zur Unterstützung temporärer Logistiknetzwerke. In: Kopfer, H., Bierwirth, Chr. (Hrsg.): *Logistik Management - Intelligente I+K Technologien*. Springer. Berlin.

- Kollmann, J., Lankenau, A., Bühlmeier, A., Krieg-Brückner, B., Röfer, T. (1997). Navigation of a Kinematically Restricted Wheelchair by the Parti-Game Algorithm. In: *Spatial Reasoning in Mobile Robots and Animals*, AISB-97 Workshop. Manchester University. 35-44.
- Kollmann, J., Röfer, T. (2000). Echtzeitkartenaufbau mit einem 180°-Laser-Entfernungssensor. In: *Autonome Mobile Systeme 2000*. Informatik aktuell. Springer (Im Erscheinen).
- Krieg-Brückner, B. (1998). A Taxonomy of Spatial Knowledge for Navigation. In: Schmid, U., Wysotzki, F. (Eds.). *Qualitative and Quantitative Approaches to Spatial Inference and the Analysis of Movements*. Technical Report, 98-2, Technische Universität Berlin, Computer Science Department.
- Krieg-Brückner, B., Gräser, A., Lohmann, B. (2000). Autonomiegewinn für behinderte Menschen durch Rehabilitations-Roboter. In: *Impulse aus der Forschung 1/2000*. Universität Bremen. 6-10.
- Krieg-Brückner, B., Röfer, T., Carmesin, H.-O., Müller, R. (1998). A Taxonomy of Spatial Knowledge for Navigation and its Application to the Bremen Autonomous Wheelchair. Freksa, Ch., Habel, Ch., Wender, K. F. (Eds.): *Spatial Cognition*. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1404. Springer. 373-397.
- Lankenau, A., Meyer, O. (1998). Safety in Robotics: The Bremen Autonomous Wheelchair. In: *Proceedings of AMC'98, 4<sup>th</sup> Int. Workshop on Advanced Motion Control*. Coimbra, Portugal. 524-529.
- Lankenau, A., Meyer, O. (1999). Formal methods in robotics: Fault tree based verification. In: *Proc. of Quality Week Europe*. Brüssel, Belgien.
- Lankenau, A., Röfer, T. (1998). Architecture of the Bremen Autonomous Wheelchair. In: Hildebrand, B., Moratz, R., Scheering, Ch. (Hrsg.): *Architectures in Cognitive Robotics*. Technischer Bericht 98/13. SFB 360 „Situierete Künstliche Kommunikatoren“. Universität Bielefeld. 19-24.
- Lankenau, A., Röfer, T. (2000a). Rollstuhl „Rolland“ unterstützt ältere und behinderte Menschen. In: FIF-Kommunikation 2/2000, *Informationstechnik und Behinderung*. Forum InformatikerInnen für Frieden und gesellschaftliche Verantwortung (FIF) e.V. 48-50.
- Lankenau, A., Röfer, T. (2000b). Smart Wheelchairs - State of the Art in an Emerging Market. In: *Zeitschrift Künstliche Intelligenz* (Erscheint im Oktober 2000).
- Lankenau, A., Röfer, T. (2000c). The Bremen Autonomous Wheelchair - A Safe and Versatile Mobility Assistant. In: *IEEE Robotics and Automation Magazine* (Erscheint im Dezember 2000).
- Lankenau, A., Röfer, T. (2000). The Role of Shared Control in Service Robots - The Bremen Autonomous Wheelchair as an Example. In: Röfer, T., Lankenau, A., Moratz, R. (Hrsg.): *Service Robotics - Applications and Safety Issues in an Emerging Market*. Workshop Notes. European Conference on Artificial Intelligence 2000 (ECAI 2000). 27-31.
- Mädl, A., Tietgens, H. (1999). Selbstlokalisierung mit Neuronalen Netzen und Wahrscheinlichkeitsgittern. Diplomarbeit. Fachbereich Mathematik und Informatik, Universität Bremen.
- Malsch, Th., Müller, H. J. (Hrsg.) (1998). Sozionik: Wie VKI und Sozionik von einander lernen können. Harburger Berichte zur Sozionik. 1, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Müller, H. J. (1996b). Negotiation Principles. In: O'Hare, G., Jennings, N. (Hrsg.): *Foundations of Distributed AI*. Wiley Interscience, 211-230.
- Müller, H.J. (1996c). When Agents Plan - Concepts and Techniques of Distributed Planning. In: J. Sauer *et al.* (Hrsg.): *Proceedings of the 10th PuK Workshop*, PAI3, infix, (Eingeladener Beitrag), pp.16 – 30.

- Müller, R. Röfer, T., Lankenau, A., Musto, A., Stein, K., Eisenkolb, A. (2000). Coarse Qualitative Descriptions in Robot Navigation. In: Freksa, Ch., Brauer, W., Habel, Ch., Wender, K. F. (Eds.): *Spatial Cognition II*. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1849. Springer. 265-276.
- Musto, A., Stein, K., Eisenkolb, A., Röfer, T. (1999). Qualitative and Quantitative Representations of Locomotion and their Application in Robot Navigation. In: *Proc. of the 16<sup>th</sup> International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*. Morgan Kaufman Publishers, Inc. San Francisco, CA. 1067-1073.
- Musto, A., Stein, K., Eisenkolb, A., Röfer, T., Brauer, W., Schill, K. (2000). From Motion Observation to Qualitative Motion Representation. In: Freksa, Ch., Brauer, W., Habel, Ch., Wender, K. F. (Eds.): *Spatial Cognition II*. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1849. Springer. 115-126.
- Ranze, K. C., Hollmann, O., Müller, H. J., Herzog, O. (1998). Handling Conflicts in Distributed Assessment Situations.- In: *Workshop 'Conflicts among agents: avoid or use them?'*. Workshop 16, ECAI'98, Brighton, UK.
- Röfer, T. (1997a). Controlling a Wheelchair with Image-based Homing. In: *Spatial Reasoning in Mobile Robots and Animals*, AISB-97 Workshop. Manchester University. 66-75.
- Röfer, T. (1997b). Routemark-Based Navigation of a Wheelchair. In: *Proc. 3<sup>rd</sup> ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems*, Bremen. 333-338.
- Röfer, T. (1998a). Panoramic Image Processing and Route Navigation. Dissertation. BISS Monographs 7. Shaker-Verlag.
- Röfer, T. (1998b). Strategies for Using a Simulation in the Development of the Bremen Autonomous Wheelchair. In: Zobel, R., Moeller, D. (Eds.): *Simulation-Past, Present and Future*. Society for Computer Simulation International. 460-464.
- Röfer, T. (1998c). Routenbeschreibung durch Odometrie-Scans. In: Wörn, H., Dillmann, R., Henrich, D. (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 1998*. Informatik aktuell. Springer. 122-129.
- Röfer, T. (1999). Route Navigation and Panoramic Image Processing. In: *Ausgezeichnete Informatikdissertationen 1998*. B. G. Teubner Stuttgart, Leipzig. 132-141.
- Röfer, T. (1999). Route Navigation Using Motion Analysis. In: Freksa, C., Mark, D. M. (Eds.): *Spatial Information Theory, Proc. COSIT '99*. Lecture Notes in Computer Science 1661. Springer. 21-36.
- Röfer, T., Lankenau, A. (1998). Architecture and Applications of the Bremen Autonomous Wheelchair. In: Wang, P. P. (Ed.): *Proc. of the 4<sup>th</sup> Joint Conference on Information Systems 1*. Association for Intelligent Machinery. 365-368.
- Röfer, T., Lankenau, A. (1999a). Ensuring Safe Obstacle Avoidance in a Shared-Control System. In: J. M. Fuertes (Hrsg.): *Proc. of the 7<sup>th</sup> International Conference on Emergent Technologies and Factory Automation*. 1405-1414.
- Röfer, T., Lankenau, A. (1999b). Ein Fahrassistent für ältere und behinderte Menschen. In: Schmidt, G., Hanebeck, U., Freyberger, F. (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 1999*. Informatik aktuell. Springer. 334-343.
- Röfer, T., Lankenau, A. (2000). Architecture and Applications of the Bremen Autonomous Wheelchair. In Wang, P. (Ed.): *Information Sciences* 126:1-4. Elsevier Science BV. 1-20.
- Röfer, T., Lankenau, A., Moratz, R. (Hrsg.) (2000). Service Robotics - Applications and Safety Issues in an Emerging Market. Workshop Notes. European Conference on Artificial Intelligence 2000 (ECAI 2000).
- Röfer, T., Müller, R. (1998). Navigation and Routemark Detection of the Bremen Autonomous Wheelchair. In: Lüth, T., Dillmann, R., Dario, P., Wörn, H. (Eds.): *Distributed Autonomous Robotics Systems*. Springer. 183-192.

- Schlieder, C. (1993). Representing visible locations for qualitative navigation. In: N. Piera Carrete & M. Singh (Eds.): *Qualitative Reasoning and Decision Technologies*. Barcelona. CIMNE. 523-532.
- Schlieder, C. (1995). Reasoning about ordering. In A. Frank & W. Kuhn (Eds.): *Proc. Conference on Spatial Information Theory*. Berlin. Springer. 341-350.
- Schlieder, C. (1996a). Qualitative shape representation. In A. Frank (Ed.): *Spatial conceptual models for geographic objects with undetermined boundaries*. London. Taylor & Francis. 123-140.
- Schlieder, C. (1996b). Ordering information and symbolic projection. In: S.K. Chang & al. (Eds.): *Intelligent image database systems*. Singapore. World Scientific. 115-140.
- Schlieder, C. (1998). Diagrammatic transformation processes on two-dimensional relational maps. In: *Journal for Visual Languages and Computing* 9. 45-59.
- Schlieder, C., & Hagen, C. (2000). Interactive layout generation with a diagrammatic constraint language. In C. Freksa, C. Habel & K. Wender (Eds.), *Spatial Cognition II* (pp.198-211). Berlin. Springer.
- Timm, I. J. (1998). Multi-Agentensysteme zur Unterstützung ökologischer Transportlogistik. In: Haasis, H.-D., Ranze, K.C. (Hrsg.): *Umweltinformatik-98 -Vernetzte Strukturen in Informatik, Umwelt und Wirtschaft* 12. Internationales Symposium „Informatik für den Umweltschutz“ der Gesellschaft für Informatik (GI). Bremen.
- Timm, I. J. (2000). Multiagent Architecture for D-Sifter – A modern approach to flexible information filtering in dynamic environments. *TZI-Technical Report* 21. Bremen.
- Timm, I. J., Knirsch, P. (1999). Ökologische Optimierung in der verteilten Tourenplanung durch Multi-Agentensysteme. In: *Proceedings des Workshops „Agententechnologie“* im Rahmen der 23. Jahrestagung für Künstliche Intelligenz, TZI-Bericht Nr. 16-99, Bremen, 1999.
- Timm, I. J., Knirsch, P., Blome, A., Schröter, M. (1998). Perspektiven von Multi-Agentensystemen in Logistikketten verteilter Produktion. In: Hellingrath, B. (Hrsg.): *Anwenderforum Logistik, KI-98: Entwicklungsrichtungen der Logistik - Anwendungsmöglichkeiten der Künstlichen Intelligenz*, Fraunhofer Institut Materialfluß und Logistik, Dortmund.
- Timm, I. J., Knirsch, P., Petsch, M., Visser, U., Fischer, K., Herzog, O., Kirn, S., Zelewski, S. (Eds.) (1999b). *Proceedings des Workshops „Agententechnologie“ auf der KI'99: Agententechnologie – Multiagentensysteme in der Informationslogistik und wirtschaftswissenschaftliche Perspektiven der Agenten-Konzeptionalisierung*. TZI-Bericht Nr. 16, Bremen.
- Timm, I., Herzog, O., Woelk, P.-O., Siebert, K., Tönshoff, H. K. (1999a). Integrierte agentenunterstützte Arbeits-Planung und Fertigungs-Steuerung (IntaPS). In: Kirn, S., Petsch, M. (Hrsg.): *Workshop „Intelligente Softwareagenten und betriebswirtschaftliche Anwendungsszenarien“*, Arbeitsbericht Nr. 14, Juli 1999, Technische Universität Ilmenau.
- Timm, I.J., Knirsch, P., Müller, H.-J., Petsch, M., Abchiche, N. , Davidsson, P., Demazeau, Y., Garijo, F. J., Herzog, O., Kirn, St., Petrie, C., Tessier, C. (Eds.) (2000). *Agent Technologies and Their Application Scenarios in Logistics*. 14<sup>th</sup> ECAI Workshop Notes (13), Berlin.
- Visser, U.; Drücker, C.; Hübner, S.; Schmidt, E.; Weland, H.-G. (2001). Recognizing Formations in Opponent Teams. Paper presented at the RoboCup-00, Robot Soccer World Cup IV, Melbourne, Australia. Springer, to appear.
- Werner, S., Krieg-Brückner, B., Herrmann, T. (2000). Modelling navigational knowledge by route graphs. In: Freksa, Ch., Brauer, W., Habel, Ch., Wender, K. F. (Eds.): *Spatial Cognition II*. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1849. Springer. 295-317.
- Werner, S., Krieg-Brückner, B., Mallot, H. A., Schweizer, K., Freksa, Ch. (1997). Spatial Cognition: The Role of Landmark, Route, and Survey Knowledge in Human and Robot Navigation. In: *Informatik '97*. Springer. Berlin, Heidelberg, New York.



## **3 Ziele und Arbeitsprogramm**

### **3.1 Ziele**

Die Arbeiten, die in diesem Projekt durchgeführt werden sollen, verfolgen drei Ziele: die Strategieerkennung von Opponenten, der Aufbau eines RoboCup-Teams und die Nutzung der Ergebnisse für den autonomen Rollstuhl (Roboter) Rolland und andere relevante Bereiche, z. B. für Electronic Commerce. Mit diesen Zielen wird ein Beitrag zur Integration von reaktiven und deliberativen Robotersteuerungen geleistet. Die Möglichkeit, Strategien in Echtzeit zu diagnostizieren (z. B. die Erkennung von Handlungen und / oder Handlungsfolgen), ist eine wichtige Unterstützung bei Handlungsentscheidungen. Diese Hypothese soll am Beispiel eines RoboCup-Teams gezeigt werden. Gleichzeitig sind wir überzeugt, dass die zu entwickelnden Methoden und Techniken in anderen Bereichen genutzt werden können.

#### **3.1.1 Strategieerkennung**

Dieses Forschungsvorhaben befasst sich mit der automatischen Diagnose von Strategien in der Umgebung befindlicher Agenten. Eine neue Herausforderung bei der Entwicklung von autonomen physikalischen Agenten ist, die Umgebung adäquat zu modellieren. In diesem Rahmen kommt der Modellierung anderer aktiver Entitäten in der Umgebung eine entscheidende Bedeutung zu. Hier soll untersucht werden, wie Aktionen anderer mobiler Agenten identifiziert und klassifiziert werden können. In einem nächsten Schritt soll aus generischen Aktionen und hieraus resultierenden Aktionsfolgen Verhaltensmuster bzw. Taktiken erkannt werden. Aus diesen Mustern lassen sich zukünftige Aktionen vorhersagen und somit ist eine Aktion in der Umgebung unter Berücksichtigung der Aktionen anderer autonomer Agenten möglich. Innerhalb dieses Bereichs sollen die anderen physikalischen Agenten nicht isoliert betrachtet werden. Vielmehr soll davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um eine selbstorganisierende Gruppe mit einem gemeinsamen, dem eigenen widersprechenden Ziel handelt. Somit ist eine Aktion der Gruppe fremder Agenten auch eine Bedrohung der eigenen Pläne, Ziele und präferierten Aktionen und muss entsprechend berücksichtigt werden. Das Agieren unter der Berücksichtigung der Handlungen Anderer setzt einen hohen Grad an Adaptivität und Lernfähigkeit zur Steuerung des Agenten voraus. Somit bilden im Besonderen auch diese Forschungsbereiche einen Schwerpunkt des Projekts.

Die Technologie der Strategieerkennung ist in zwei wichtigen Forschungsgebieten von großem Interesse. Auf der einen Seite kann die Vorhersagequalität von Aktionen physikalischer Agenten gesteigert werden, was im Rahmen der Steuerung autonomer Agenten eine große Rolle spielt, auf der anderen Seite ist im Bereich des Electronic Commerce die Steigerung der Robustheit und Sicherheit von elektronischen Märkten wichtig.

#### **3.1.2 Aufbau eines realen RoboCup-Teams**

Der RoboCup liefert ein gutes Szenario zur Entwicklung und Evaluation von Algorithmen zur automatischen Strategiediagnose, da das generelle Problem von der Komplexität her stark reduziert ist, aber trotzdem die wichtigsten Fragestellungen beinhaltet. Hier finden sich weiterhin durch die vorangegangenen Wettbewerbe zahlreiche verfügbare Strategien (Veloso *et al.*, 2000) und durch den populären Charakter ist zu erwarten, dass diese in Zukunft weiter zunehmen, so dass eine vernünftige Evaluation der Methoden möglich ist.

Ein weiterer Vorteil des RoboCup Szenarios ist, dass es eine Gruppe kooperierender Agenten gibt, die gemeinsam ein Modell der Umgebung entwickeln können, das vollständiger ist als das Bild,

das ein einzelner autonomer Agent von der realen Welt aufbauen kann. Auf der anderen Seite gibt es eine Gruppe von konkurrierenden Robotern, bei denen vorausgesetzt werden kann, dass sie die eigenen Aktionen stören werden und selbst ein einfach zu definierendes Ziel (Torschuss bzw. Gewinn des Spiels) verfolgen.

Aufbauend auf den bisherigen Arbeiten in der Simulationsliga (Visser *et al.*, 2001) und im Bereich Robotik soll die Strategieerkennung zuerst auf die Bewegungsdaten anderer Roboter-Teams angewendet werden, z. B. auf die Log-Dateien von CS Freiburg, dem Weltmeister in der Middle-Size-League 1998 und 2000, dies wurde bereits mit Prof. Bernhard Nebel (Universität Freiburg) vereinbart.

Da das langfristige Ziel des hier vorgestellten Forschungsvorhabens aber darin besteht, nicht nur die Strategie des Gegners zu erkennen, sondern auch angemessen darauf zu reagieren, ist der Aufbau eines eigenen RoboCup-Teams notwendig, da auch eine intensive Kooperation mit anderen Arbeitsgruppen nicht das Vorhandensein der Experimentalhardware vor Ort ersetzen kann. Da ein Team in der Middle-Size-League den finanziellen Rahmen dieses Antrags sprengen würde, ist der Aufbau eines Teams in der kostengünstigeren Sony-Legged-League geplant – auch, weil die Arbeitsgruppe von Prof. Hans-Dieter Burkhard (Humboldt Universität Berlin) hierfür ihre Unterstützung (Software, Know-how) zugesagt hat und die Kooperation mit weiteren Gruppen im Schwerpunktprogramm möglich wird. Der Aufbau eines RoboCup-Teams selbst wird in der Lehre angesiedelt: Im Oktober 2000 startet in Bremen ein zweijähriges, von den Antragsteller initiiertes Hauptstudiumsprojekt zum Thema „RoboCup“, für das sich etwa 30 Studenten gemeldet haben. Sie stellen ein ausreichendes personelles Potential da, um ein RoboCup-Team aufzubauen und somit die Grundlagen für Experimente zu dem hier beantragten Forschungsvorhaben zu schaffen. Der beantragte Mitarbeiter für den Bereich „Kognitive Robotik“ soll diese grundlegenden Arbeiten betreuen, sie stellen aber nicht sein zentrales Aufgabengebiet dar.

### ***3.1.3 Nutzung für den Bremer Autonomen Rollstuhl***

Die zentrale Zielsetzung der Strategieerkennung autonomer Agenten soll auch für den Bremer Autonomen Rollstuhl nutzbar gemacht werden. Hierbei sind die anderen Agenten allerdings keine gegnerischen Roboter, sondern Personen, zwischen denen sich der Rollstuhl bewegt.

In der bisherigen Realisierung kann der Bremer Autonome Rollstuhl „Rolland“ keine Bewegung erkennen und ist daher gezwungen, alle detektierten Hindernisse als ortsfest anzunehmen. Dies führt zu einem dazu, dass zu früh vor sich vom Rollstuhl weg bewegenden Objekten angehalten wird, zum anderen kann nicht erkannt werden, dass sich Personen auf das autonome System zu bewegen, weshalb keine Ausweichmanöver ausgeführt werden können. Die Erkennung der Bewegung der den Rollstuhl umgebenden Personen kann sowohl die Geschwindigkeit als auch die Sicherheit des Systems erhöhen, da vorhergesagt werden kann, welche Passanten die Bahn des Systems kreuzen werden und welche nicht. Noch leistungsfähiger wird der Ansatz, wenn neben der messbaren Bewegungsrichtung der Personen auch noch ihre wahrscheinliche Bewegung vorhergesagt werden kann (Bewegungsprädiktion). Diese hängt von der Situation ab, in der sich der Rollstuhl gerade befindet, z.B. auf dem Fußweg (selten kreuzende Passanten) oder auf einem Platz (Menschen laufen durcheinander). Die Strategieerkennung wäre hierbei also eher eine Situationserkennung; im Unterschied zum RoboCup-Szenario werden nicht die Aktionen einer kleinen Gruppe von Agenten (eines Teams) analysiert, sondern die von ständig wechselnden Personen, die sich aber alle ähnlich (d.h. situationsabhängig) verhalten.

Auf der Basis dieser Informationen soll dann längerfristig ein Navigationsverhalten entwickelt werden, das ein „Mitschwimmen“ des Rollstuhls in einer sich bewegenden Menschenmenge ermöglicht. Dadurch kommt es zu einer natürlichen Kooperation des Fahrzeugs mit seiner Umgebung, ähnlich wie Menschen in solchen Situationen ihre Bewegungen mit denen anderer koordinieren. Für ein solches Verhalten existieren eine ganze Reihe von Ansätzen (z.B. Mataric, 1997; Hong und Loo, 1998), von denen bisher aber keines auf einem realen, kinematisch beschränkten System umgesetzt wurde.

### **3.1.4 Relevanz für den Elektronischen Handel**

Die Bedeutung der Multiagentensysteme für die Betriebswirtschaft und den Einsatz im elektronischen Handel nimmt immer mehr zu. Hier konnten sich bisher Multiagentensysteme jedoch nicht durchsetzen, da sie u.a. im Einsatz in elektronischen Märkten durch das Einschleusen „feindseliger“ Agenten zu einem unkalkulierbaren Risiko werden können. Sollen Kooperationen durch Multiagentensysteme nicht nur in geschlossenen Märkten unterstützt werden, wo die Kooperationspartner bekannt sind und externe (außerhalb des Agentensystems zu vereinbarende) Verträge das Verhalten stark einschränken, ist es für die Agenten notwendig, fremde Strategien zu erkennen und entsprechend zu reagieren. Es ist auch denkbar, Agenten mit speziellen Funktionen, wie der Strategieerkennung, zum Schutze des Systems einzusetzen, die destruktive oder sabotierende Agenten aus dem Markt ausschließen können. Hierbei reicht das Ziel dieser Diagnostik „gegnerischen“ Verhaltens von sicherheitspolitischen Aspekten, wie der Vermeidung einer Sabotage des Marktes, bis hin zur Optimierung des eigenen Ertrags. Die Anpassung von Strategien an gegnerische Verhaltensweisen wird üblicherweise durch eine Analyse bestimmter Indikatoren vollzogen. Hierbei beziehen sich die Indikatoren auf eigene und somit „objektiv“ messbare Parameter. Neu an diesem Ansatz ist der Versuch, das gegnerische Verhalten in Form einer Strategie zu erkennen und so gezielt nicht nur auf Basis des aktuellen Zustands, sondern auch unter Hinzunahme des voraussichtlichen Verhaltens des Gegners eine Strategie bzw. Aktion auszuwählen.

### **3.1.5 Einordnung in das Schwerpunktprogramm**

Das Arbeitsprogramm des Schwerpunktprogramms umfasst Forschungsbereiche, die „für schnelle, mobile Roboter relevant sind“ (Auszug aus dem SPP-Antrag, S. 7). Dabei ist das wesentliche Forschungsziel eine Kombination von schneller Reaktion, Autonomie und Kooperation. Autonome, mobile Roboter sollen damit in dynamischen Umgebungen und auf unvorhersehbare Ereignisse schnell und vor allem im Team reagieren können.

Unser Ansatz liefert mit der Erkennung von gegnerischen Strategien einen wichtigen Beitrag zur Entscheidungsfindung der Roboter in Echtzeit. Die Arbeiten für das Simulationsteam Virtual Werder (vgl. 2.2.2) haben gezeigt, dass sich die Spielergebnisse signifikant verbessern. Die zu leistenden Arbeiten in ordnen sich in die Teildisziplin Lernverfahren, genauer *Lernen komplexer Aufgaben und Handlungsverläufe in Multiagentensystemen* ein (vgl. SPP-Antrag, S. 8). Dabei ist vorgesehen, nicht nur neuronale Lernverfahren zu verwenden oder zu modifizieren, sondern ebenso symbolische Lernverfahren zu betrachten (z. B. C4.5 (Quinlan, 1993), AQ18-STAR (Kaufman und Michalski, 1999)).

Durch das Erkennen von Handlungen bzw. Handlungsfolgen können Entscheidungen schneller und effektiver getroffen werden. Deswegen werden Reaktionen und eigene Aktionen in Roboter-Teams in dynamischen Umgebungen wirksamer. Hiermit und mit dem Aufbau eines RoboCup-Teams (Legged league) ordnen wir uns weiterhin in die Teildisziplin „Kooperation und Multiagentensysteme“ ein.

## 3.2 Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm des Forschungsvorhabens gliedert sich in fünf Phasen, wobei jede Phase in mehrere Arbeitspakete (AP) unterteilt ist, die in enger Kooperation von den Antragstellern zum Teil parallel von den Wissenschaftlichen Mitarbeitern bearbeitet werden. Die Phasen enden jeweils mit einer Zusammenführung der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Bereichen, so dass in beiden Bereichen die nächste Phase auf einer gemeinsamen Basis begonnen werden kann.

### 3.2.1 Phase 1 – Schnittstelle zur Strategieerkennung

**AP1 – Schnittstelle.** Die Strategieerkennung, basierend auf Bewegungsdaten, soll in vier verschiedenen Szenarien angewendet werden, von denen drei dem RoboCup angehören (Simulationsliga/Virtual Werder, Middle-Size-League, Sony-Legged-League), das vierte ist die Situationsanalyse für den Bremer Autonomen Rollstuhl. Für die Strategieerkennung muss eine Schnittstelle geschaffen werden, die flexibel genug ist, die Bewegungsdaten aus all diesen Szenarien zu übernehmen, die in ihrer Art (z.B. ist im RoboCup die Anzahl der Agenten konstant, dagegen laufen aber unterschiedlich viele, ständig wechselnde Personen um den Rollstuhl herum) und Genauigkeit unterscheiden. Die Daten müssen on-the-fly verarbeitet werden, d.h. während die Strategieerkennung läuft, treffen ständig neue Informationen ein, es sei denn, sie stammen aus einer Log-Datei.

Im ersten Arbeitspaket soll diese Schnittstelle festgelegt werden und sowohl eine Anpassung für Virtual Werder (Simulationsliga) implementiert werden, als auch ein Konverter für die Log-Dateien des Freiburger RoboCup-Teams (Middle-Size-League). 2 × 1 PM (IS, KR)

### 3.2.2 Phase 2 – Erkennen von Positionen und Aktionen

In der zweiten Phase wird zum einen die Grundlage für eine spätere Bewegungserkennung im physikalischen Umfeld geschaffen, d.h. die *Positionserkennung*, also die Bestimmung der metrischen Positionen, an denen sich fremde Agenten befinden, allerdings nur derjenigen, die zum Zeitpunkt der Erfassung auch sichtbar sind. Zum anderen wird an der Erkennung von Aktionen gearbeitet, die aus solchen Positionsdaten gewonnen werden können. Da diese Arbeiten parallel ablaufen, stützt sich die Aktionserkennung zuerst auf die Daten aus der Simulationsliga und die vom CS Freiburg oder anderen Schwerpunkt-Mitgliedern bereitgestellten Daten. Außerdem implementiert die Kognitive Robotik eine Ad-Hoc-Lösung für eine Positionserkennung bei den Sony-Robotern, die recht frühzeitig Ergebnisse liefern wird. Danach wird in mehreren Schritten eine Positionsbestimmung mit der robotereigenen Sensorik realisiert, die sich auf Bildverarbeitungsmethoden stützt. Das besondere an den Arbeiten an den Sony-Robotern ist, dass diese hier von dem Wissenschaftlichen Mitarbeiter aus dem Bereich „Kognitive Robotik“ nur *betreut* werden sollen, da sie im Wesentlichen im studentischen Projekt durchgeführt werden. Dies hat zur Folge, dass sich der Wissenschaftliche Mitarbeiter auch mit der Erfassung der Positionen der den Rollstuhl umgebenden Personen beschäftigen kann.

**AP2.1 – Ad-hoc-Positionserkennung für das eigene Sony-Legged-Team.** Eine Positions- bzw. Bewegungserkennung für die Sony-Hunde ist ein schwieriges Bildverarbeitungsproblem. Daher wird in einem ersten Schritt eine externe Logging-Funktion implementiert, bei der den Robotern Markierungen auf den Rücken geklebt werden, die von einer Deckenkamera erfasst werden. Die Marken werden Abwandlungen der von Krieg-Brückner *et al.* (1998) eingesetzten Exemplare sein, deren Erkennung gleichermaßen einfach als auch robust ist und eine Positionserfassung in *x*- und *y*-Richtung sowie der Rotation ermöglichen wird. Der Ball hingegen wird durch eine einfache

Farbsegmentierung erkannt, eine Erkennung der Orientierung ist hierbei nicht notwendig.  
*1 PM (KR)*

**AP2.2 – Selbstlokalisierung auf dem Spielfeld.** Damit die Roboter ihre eigene Position auf dem Spielfeld ermitteln können, sind im offiziellen Setup der Liga Farbmarken am Rand platziert. Diese müssen durch Farbsegmentierung erkannt werden. Durch die Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Hans-Dieter Burkhard (Humboldt-Universität Berlin) können hierbei wahrscheinlich sehr schnell Ergebnisse erzielt werden.  
*1 PM (KR)*

**AP2.3 – Lokalisation des Balls.** Hier muss die Methode zur Ballerkennung aus der Ad-hoc-Positionserkennung auf die Roboter portiert werden. Die Erfassung des Balls ist aus der Feldperspektive deutlich komplizierter als aus der Beobachterperspektive, da der er im Kamerabild keine konstante Größe aufweist, stärker verdeckt sein kann und die Farbe durch Reflektionen stärker verfälscht werden kann. Da die Ballerkennung prinzipiell mit der in der Middle-Size-League identisch ist, kann dieses Problem auch in Kooperation mit anderen Gruppen angegangen werden, bzw. existierende Lösungen übernommen werden.  
*1 PM (KR)*

**AP2.4 – Lokalisation des Gegners.** Ein ungleich schwierigeres Problem ist die Lokalisierung der Opponenten mit Bildverarbeitungsmethoden. Die Sony-Roboter haben eine komplizierte Form und sehen aus unterschiedlichen Richtungen verschieden aus. Bei der Erkennung wird man mit einer Segmentierung des Spielfelds beginnen, die in der Fläche detektierten Löcher enthalten wahrscheinlich die Spieler auf dem Feld. In dieser Phase beschränkt sich die Erkennung auf die fremden Roboter, die im Kamerabild sichtbar sind; eine Kommunikation und Koordination mit anderen Robotern des eigenen Teams findet nicht statt. Da hier mit studentischer Unterstützung gearbeitet wird, fällt die Arbeitsbelastung für den Wissenschaftlichen Mitarbeiter im Vergleich zum Problebumfang deutlich geringer aus.  
*2 PM (KR)*

**AP2.5 – Positionserkennung der den Rollstuhl umgebenden Menschen.** Im Fall des Bremer Autonomen Rollstuhls wird ein Laserscanner als Sensor zu Wahrnehmung der Umgebung eingesetzt, weil – im Gegensatz zum RoboCup, wo große Teile der Umgebung sehr genau bekannt sind (Spielfeld, Spieler, Ball) – das Erkennen von Menschen in einem unbekanntem Umfeld deutlich schwieriger ist. Daher ist es günstiger, einen Sensor zu verwenden, der bereits Entfernungsdaten liefert, statt metrische Informationen aus Bilddaten zu extrahieren. Da die Entfernungen zu den Objekten direkt aus den Messdaten entnommen werden können, gilt es nur, den Zusammenhang zwischen Messpunkten zu ermitteln, d.h. festzustellen, welche Punkte zu derselben Person gehören. Unter der Annahme, dass Personen nicht zusammenstoßen, existiert zwischen ihnen ein Mindestabstand, der eine solche Unterteilung ermöglicht.  
*2 PM (KR)*

**AP 2.6 – Klassifikation von Situationen.** Im Rahmen der Strategiediagnose spielt die Initialisierung der Umgebung und die erste Selbstorganisation des Umfeldes eine entscheidende Rolle. Im Rahmen des RoboCup Anwendungsszenarios bestimmt die Aufstellung der Spieler häufig schon ein angewendetes Spielsystem der gegnerischen Mannschaft. Die hierfür im Rahmen von der Simulationsliga (Virtual Werder) entwickelten Ansätze werden in diesem Arbeitspaket auf die Anwendung in der Middle-Size Liga anhand der Daten von CS Freiburg überprüft und weiterentwickelt werden. Weiterhin wird hier ein erstes qualitatives räumliches Modell erstellt, über das zu fixen Zeitpunkten für Aktionen charakteristische Situationen bzw. Aufstellungen identifiziert werden können.  
*2 PM (IS)*

**AP 2.7 – Klassifikation von Aktionen.** Das Erkennen von Aktionen ist eine der grundlegenden Technologien zur erfolgreichen Strategiediagnose in Multiagentensystemen. Schwerpunkt inner-

halb dieses Teilpaketes ist die Identifikation von Aktionen, die im Rahmen von RoboCup eine Rolle spielen, die sich im Simulationsumfeld und auf Basis der Daten von CS Freiburg erfassen lassen und der Entwicklung einer Methodik zur Identifikation. Hierbei soll auf die Ergebnisse der Simulationsliga (Virtual Werder) aber auch weitläufige Erfahrung der Gruppe im Rahmen der Klassifikation zurückgegriffen werden. Es müssen verschiedene Klassifikationsverfahren (Maschinelles Lernen, Clustering, Neuronale Netze aber auch Case-based Reasoning) verglichen werden und entsprechend ihrer Eignung in die Methodik integriert werden. 3 PM (IS)

**AP 2.8 – Identifikation physikalischer Aktionen.** In diesem Teilpaket werden die Ergebnisse der Situationserkennung und Aktionsklassifikation auf die Anforderungen des physikalischen Umfeldes angepasst. Hierzu sollen im besonderen die Ergebnisse und Daten der Ad-hoc Positionserkennung (AP2.1) Anwendung finden und um die Bereiche der Selbstlokalisierung und Lokalisation des Balles erweitert werden. Aus diesen Daten wird ein Modell zur Klassifikation von Aktionen im physikalischen Umfeld entwickelt. Ferner ist im Rahmen dieses Teilpaketes sowohl die Verwendung von geometrischen Daten über die Lokalisation anderer Agenten, als auch die Auswertung von visuellen Informationen mit Hilfe von Bildverarbeitungsverfahren vorgesehen. Es wird angestrebt im Rahmen von dem in AP2.6 erstellten qualitativen räumlichen Modellen nicht nur Situationen zu erkennen und unter Berücksichtigung der Aktionsklassifikation physikalische Aktionen zu identifizieren und zu klassifizieren, sondern auch Constraints, die die Menge der möglichen zu erkennenden Aktionen einschränkt, zu berücksichtigen. 2 PM (IS)

**AP 2.9 – Integration.** Als Abschluss von Phase 2 wird die Aktionserkennung auch an vom Rollstuhl gelieferten Positionsdaten angepasst. Die Positionserkennung für die Sony-Roboter wird zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen sein und wird sich mit der nachfolgenden Phase überlappen. Dies ist möglich, da die dritte Phase bei der Bewegungserkennung auf den Rollstuhl fixiert ist und daher für die durch Studenten gestützte Entwicklung in der Sony-Legged-League mehr Zeit bleibt. 2 × 1 PM (IS, KR)

### 3.2.3 Phase 3 – Erkennen von Bewegung und Aktionsfolgen

In der dritten Phase soll zum einen aus den Positionsdaten auf Bewegungen geschlossen werden, zum anderen soll die Erkennung von Aktionen auf Aktionsfolgen erweitert werden.

**AP3.1 – Erkennen von Bewegung.** Das Erkennen von Bewegung bedeutet, dass in aufeinanderfolgenden Wahrnehmungen der Umgebung die Messdaten einander zugeordnet werden, die zum selben Objekt gehören. Dies soll in den zwei Szenarien unterschiedlich realisiert werden. In der Sony-Legged-League bewegen sich die Roboter im Vergleich zu ihrer Größe nur sehr langsam, daher kann die Bewegung unmittelbar aus der räumlichen Nähe der in Phase 2 ermittelten Positionen geschlossen werden. Bei der Erkennung der Bewegung von Menschen durch den Rollstuhl sieht dies anders aus: Personen bewegen sich schneller und auch der Rollstuhl selbst ist in Bewegung. Daher soll die Bewegung der Personen durch einen Scanüberdeckungsansatz ermittelt werden. Aus den im Abschnitt 2.1.2 vorgestellten Verfahren zur Scankorrelation muss eines ausgewählt werden, das keine Vorannahmen über Geometrie der vom Scanner erfassten Objekte macht (z.B. keine Geradlinigkeit), da die „Form“ der den Rollstuhl umgebenden Personen im Sichtbereich des Scanners recht zufällig sein kann. Anders als in Abschnitt 2.1.2 vorgestellt wurde, soll die Überdeckung nicht auf vollständige Scans angewendet werden sondern nur auf Paare von Messpunktgruppen, von denen vermutet wird, dass sie Personen repräsentieren. Dies muss implementiert und mit Log-Dateien des Rollstuhls und während der Fahrt getestet werden. 5 PM (KR)

**AP3.2 – Erkennen von Aktionsfolgen.** Die Aktionsfolgen ergeben sich aus der Kombination von Aktionen. Für die Erkennung ist es hierbei wichtig, dass die „richtigen“ Aktionen zu Aktionsfolgen kombiniert werden. In diesem Arbeitspaket ist also erheblicher Aufwand zu leisten, um einen adäquaten Ansatz zu entwickeln, der es ermöglicht, von einer Reihe von Einzelaktionen auf eine Aktionsfolge zu schließen. Hierfür wird das räumliche Modell um zeitliche Aspekte erweitert. Durch eine geeignete Abstraktion von den Einzelaktionen können z.B. durch Ähnlichkeit des Handelnden, der örtlichen Auswirkung von Aktionen oder den zeitlichen Abhängigkeiten zwischen Aktionen auf Aktionsfolgen geschlossen werden. Alternativ soll ein Ansatz untersucht werden, der auf der Wiedererkennung von Plänen basiert (Plan Recognition, Bauer *et al.*, 1995). Hierbei wird angenommen, dass der Gegner einen bekannten Plan verwendet. So muss nur versucht werden, auf Basis verschiedener Aktionen, die passende Aktionsfolge in einem Plan der Planbibliothek zu finden.

3 PM (IS)

**AP3.3 – Erkennen von Taktiken.** Das Erkennen von Aktionsfolgen ist eine Voraussetzung, um Taktiken zu erkennen. Unter Taktiken werden hier kurzfristige, zielgerichtete Aktionsfolgen verstanden. Dieses Teilpaket beschäftigt sich im Besonderen mit der Prädiktion von Verhalten, d.h. ausgehend von einer Aktionsfolge soll auf ein Ziel geschlossen werden, so dass die nächste Aktion vorhergesagt werden kann, z.B. wenn ein Spieler einen Ball getroffen hat, ist es wahrscheinlich, dass er auf das Tor schießen wird. Dieser Ansatz würde eine explizite Verwendung von Zielen voraussetzen. Ein Ziel dieses Teilpaketes ist es, Verfahren zur Prädiktion von Aktionen über Taktiken mit Verfahren zu vergleichen, die auf Basis einer Sequenz von Aktionen eine Aktion vorherzusagen. Dieses können statistische Verfahren sein, aber auch Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens und der konnektionistischen Wissensverarbeitung. Diese Problematik wird hier nicht abschließend bearbeitet, stellt aber für das nächste AP (Phase 4) eine wichtige Voraussetzung dar.

2 PM (IS)

**AP3.4 – Integration.** Am Ende von Phase 3 fließen die Ergebnisse der Bewegungserkennung in die Aktionsfolgendetektion ein, wodurch sich diese weiter verbessert, da nun bekannt ist, welcher Agent an verschiedenen Stellen der Umgebung in Aktion getreten ist; zuvor konnten die Agenten nicht unterschieden werden.

2 × 1 PM (IS, KR)

### 3.2.4 Phase 4 – Modellierung fremder Agenten

In der vierten Phase werden die betrachteten fremden Agenten modelliert: Auf der Ebene der Bewegungserkennung, um auch Aussagen über den Aufenthaltsort eines Agenten machen zu können, wenn dieser – aus Sicht des Betrachters – gerade von einem anderen Agenten verdeckt wird. Auf der Ebene der Verhaltensanalyse werden die erkannten Aktionsfolgen klassifiziert und auf Stärken und Schwächen hin analysiert.

**AP4.1 – Bewegungsprädiktion.** Die in Phase 3 beschriebene Bewegungserkennung liefert nur Daten zu fremden Agenten, die zum aktuellen Zeitpunkt sensorisch wahrgenommen werden können. Kennt man aber die Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung eines Agenten, kann man seine wahrscheinliche Bewegung fortschreiben. Wurden zuvor auch Rahmendaten wie die Höchstgeschwindigkeit oder Drehgeschwindigkeit als auch die Häufigkeit von Richtungsänderungen erhoben, lassen sich die Vorhersagen noch weiter verbessern. Diese Daten bilden auch einen Teil der Basis für ein ausgefeilteres Opponentenmodell.

2 × 2 PM (IS, KR)

**AP4.2 – Kooperatives Weltmodell.** Im RoboCup-Szenario besteht zusätzlich die Möglichkeit der Kommunikation zwischen den Robotern des eigenen Teams. Hierdurch können die Einzelansich-

ten zu einem Gesamtbild integriert werden. Außerdem wird das Problem gelöst, welche der erkannten Agenten zum eigenen Team und nicht zum Gegner gehören. 2 PM (KR)

**AP 4.3 – Opponentenmodellierung, Diagnose bzgl. Stärken und Schwächen.** Die bisherigen Arbeitspakete haben sich mehr auf das zu Beobachtende bezogen. In AP3.3 wird angefangen, auch Aktionen, die noch nicht erfolgt sind, zu betrachten. Dieses ist ein wesentlicher Punkt, um ein adäquates Opponentenmodell aufzubauen. Im AP4.3 soll ein Opponentenmodell entworfen werden, das auch eine Entscheidungsunterstützung für die Aktivierung kurzfristiger Taktiken bietet. Das Opponentenmodell soll zum einen aus Ergebnissen einer deskriptiven Statistik über Aktionen und Aktionsfolgen des Gegners bestehen, hierzu gehören z.B. Geschwindigkeit, Bewegung, Ballkontakt etc. Ausgehend von diesen Beobachtungen und der Prädiktion der nächsten Aktion, kann die nächste reale Aktion bewertet werden. Ist die Aktion nicht entsprechend der Erwartung durchgeführt worden, kann dieses an einer Schwäche liegen, wie Treffungsgenauigkeit, Probleme bei der Selbstlokalisierung, der Hindernisvermeidung etc. Das Opponentenmodell soll automatisch auf Basis solcher Auswertungen erstellt und gepflegt werden. Im Weiteren sollen Ansätze aus der Simulationsliga verwendet werden, die sich zur Erkennung von Schwachstellen eignen (Raines *et al.*, 2000 ; Frank *et al.*, 2000). Auf Basis der vorangegangenen beiden Teilpakete soll ein integriertes Modell entstehen, in dem ein Gegner auf Basis der erkannten physikalischen Aktionen und Aktionsfolgen sowie seiner Stärken und Schwächen repräsentiert wird. Diese Modellierung soll anhand von Log-Dateien und realen Experimenten validiert werden. 2 PM (IS)

**AP4.4 – Integration.** Zum Abschluss der vierten Phase werden Bewegungserkennung und Opponentenmodellierung weiter integriert, so dass sie sich gegenseitig stützen und somit die Robustheit erhöht wird. 2 × 1 (IS, KR)

### 3.2.5 Phase 5 – Strategiediagnose

In dieser Phase werden aufwendigere Analysen des Gegners bzw. Gegenübers vorgenommen. Für den Rollstuhl bedeutet dies eine *Situationserkennung*, d.h. aus der Bewegung der Passanten auf die gegenwärtige Verkehrssituation zu schließen. Die Analyse der Stärken und Schwächen mündet dagegen in der Ermittlung eines adäquaten Verhaltens gegen längerfristige Pläne gegnerischer Agenten und Agentengruppen. Dieser Bereich der *Strategiediagnose* ist der Inhalt des letzten Arbeitspaketes der ersten Antragsphase. Der Schwerpunkt liegt hier auf der Erweiterung des gegnerischen Verhaltens auf längerfristige Aktionsfolgen und Teamverhalten.

**AP5.1 – Situationserkennung.** Personengruppen bewegen sich in verschiedenen Verkehrssituation unterschiedlich. Gehen sie z.B. einen Fußweg entlang, sind die Bewegungen gleichförmig und gleichmäßig. Hier kann sich der Rollstuhl gut einordnen. Überquert er aber einen Platz, laufen die Menschen durcheinander, es bietet sich an, langsamer zu fahren. Derartige Situationen sollen aus den erstellten Bewegungsprofilen der den Rollstuhl umgebenden Personen gewonnen werden, indem die Bewegungen klassifiziert und deren Häufigkeiten betrachtet werden. 4 PM (KR)

**AP5.2 – Modellierung von Mannschaftsverhalten.** Die Strategieerkennung setzt auf der in Arbeitspaket 3.2 bearbeiteten Identifizierung von Aktionsfolgen auf. Sie berücksichtigt zusätzlich zu den Aktionsfolgen einzelner Agenten die Dynamik der Aktionen von Agentengruppen. In den RoboCup-Szenarien ist diese Dynamik durch die zeitliche Entwicklung der räumlichen Positionen der gegnerischen Mannschaft gegeben. Deshalb wird in einem ersten Schritt eine Modellierung der Dynamik auf Mannschaftsebene entwickelt, die vom raumzeitlichen Kontinuum des Spielgeschehens so abstrahiert, dass die Modellierung als Eingabe für Klassifikationsverfahren dienen kann. Hierzu bietet sich eine Modellierung auf Grundlage von qualitativen Lagerepräsentationen an, die

ordinales räumliches Wissen rotationsinvariant enkodieren, wie beispielsweise die Panoramarepräsentation von Schlieder (1996). 2 PM (IS)

**AP5.3 – Klassifikation von Mannschaftsverhalten.** In einem zweiten Schritt werden geeignete maschinelle Lernverfahren zur Klassifikation eingesetzt. Aufgrund der mit Virtual Werder gemachten Erfahrungen (Visser *et al.*, 2001) wird zunächst eine Klassifikation mit einfachen vorwärtsgerichteten neuronalen Netzen versucht und bei Bedarf auf komplexere Typen von Netzen zurückgegriffen. Zielsetzung dieses Arbeitspaketes ist, zunächst einfache Spielzüge wie einen Doppelpass zu identifizieren. Darauf aufbauend werden dann einfache Strategien, z.B. eine Abseitsfalle, erkannt. 2 PM (IS)

### 3.2.6 Begleitende Aktivitäten

Schwerpunkt dieses Arbeitspaketes ist die Berichterstattung über und Dokumentation der erreichten Forschungsergebnisse. Dies beinhaltet deren Aufbereitung und Publikation in nationalen und internationalen Fachzeitschriften, auf den im Rahmen des Schwerpunktprogramms stattfindenden gemeinsamen Workshops sowie auf Fachtagungen. Des weiteren umfasst dieses Arbeitspaket die Berichterstattung gegenüber der DFG. Ein weiterer Aspekt findet sich in der kontinuierlichen Evaluierung und Validierung der Zwischenergebnisse und hierfür der Erarbeitung von unterschiedlichen Anwendungsfällen und Randbedingungen. Dieses Arbeitspaket wird begleitend während der gesamten Projektbearbeitung durchgeführt. 2 × 2 PM (IS, KR)

### 3.3 Arbeits- und Zeitplan

Der zeitliche Aufbau des Arbeitsprogramms des Forschungsvorhabens ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Laufzeit der einzelnen Arbeitspakete (Bezeichnung in der ersten Tabellenspalte) ist durch Balken über der Zeitachse dargestellt. Bei der Bezeichnung der Zeitachse wird von dem geplanten Beginn des Forschungsvorhabens im 2. Quartal 2001 (01.06.2000) ausgegangen.

### 3.4 Weitere Perspektiven

Der Schwerpunkt der ersten zwei Jahre des Projektes liegt in der Identifikation und Klassifikation von gegnerischen Aktionen, Aktionsfolgen, Taktiken und Strategien, sowie der Schaffung der Basis für solche Arbeiten auf realen Systemen, d.h. der Detektion von Bewegung fremder Roboter oder Menschen. Hierbei wird eine Beschränkung auf nur einen Gegner (bzw. Gegenüber) oder einfache Teamkonstellationen verwendet. Im Rahmen realer Anwendungsszenarien, wie dem Bremer Autonomen Rollstuhl oder dem elektronischen Handel ist es jedoch auch wichtig, gegnerisches Verhalten, seine Anpassung an eine veränderte Umgebung und ggf. komplexe Gruppenverhalten abzubilden.

In den darauffolgenden zwei Jahren soll die Identifikation und Klassifikation von komplexen Aktionsfolgen in physikalischen Umgebungen erforscht werden. Auf dieser Basis soll dann eine Diagnose komplexer gegnerischer Verhalten und Strategien erfolgen, die sowohl das kurzfristige Handeln, also die reaktiven Anteile, als auch das langfristige Planen von kooperierenden Gegnern, also die deliberativen Aspekte, berücksichtigt. Stärken und Schwächen sollen analysiert werden; Ziel ist hier die Verhaltenssteuerung und Strategieauswahl für kooperierende Teams physikalischer Agenten auf Basis gegnerischer Strategien.

Abschließend soll in der dritten Phase des Schwerpunktprogramms die natürliche Verteiltheit der autonomen Agenten adäquat berücksichtigt werden. Hierfür ist es notwendig, dezentrale Koordination und dezentrale Identifikation, Klassifikation und Diagnose komplexer Aktionsfolgen und Stra-

tegien zu ermöglichen und entsprechende Methoden zu entwickeln, die gerade im Bereich von geringer Bandbreite der möglichen Kommunikation und unsicheren Übertragungswegen ein

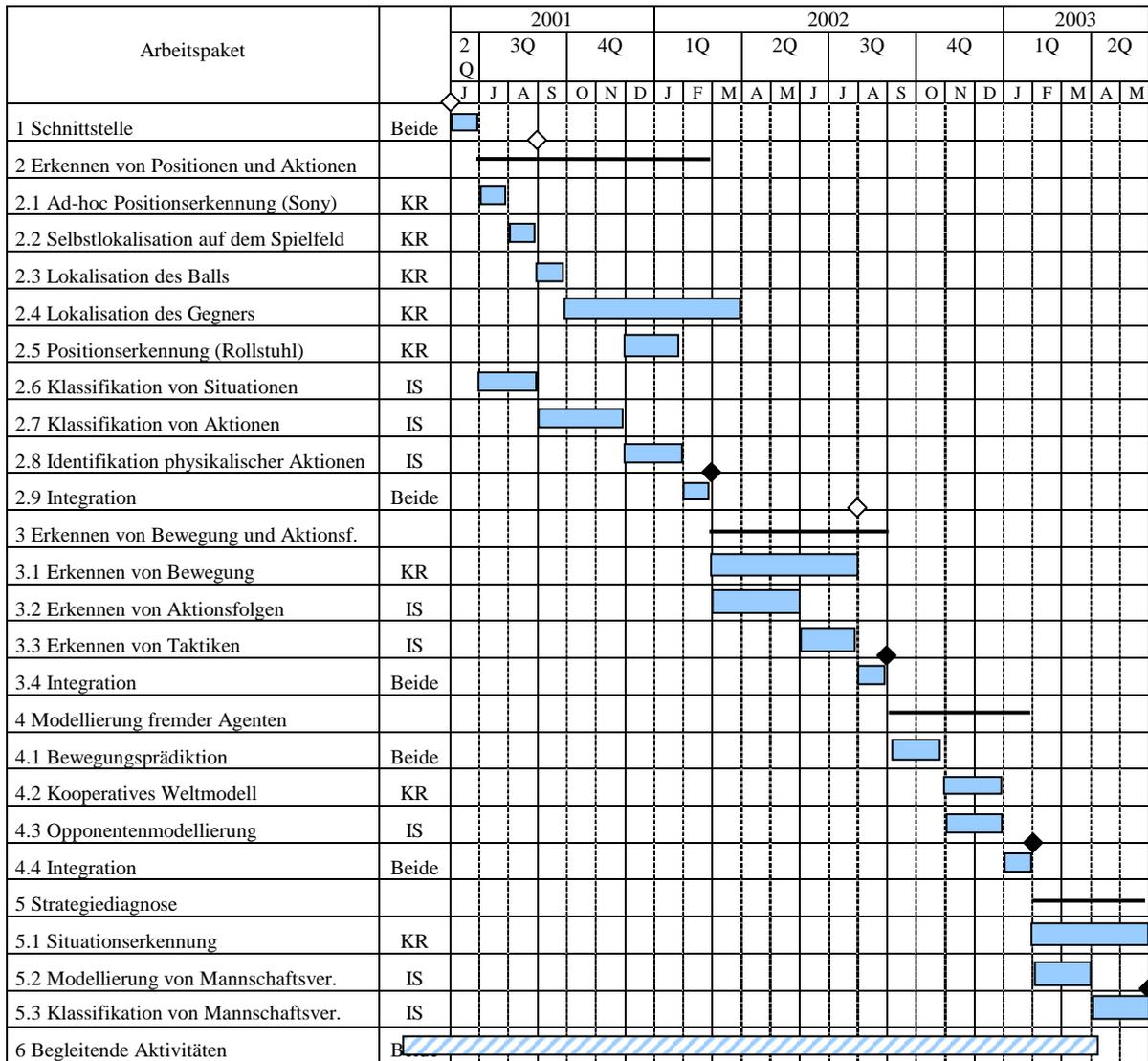


Abbildung 3: Der Arbeitsplan. Die Rauten repräsentieren Meilensteine, die schwarzen jeweils den Abschluss einer Projektphase, die weißen die Termine „German Open“, „RoboCup 2001“ und „RoboCup 2002“.

robustes Agentenverhalten garantieren. Im Weiteren soll hier auch besonders der Aspekt dynamischer Strategien und Verhalten gegnerischer Agenten und Teams untersucht werden, da davon ausgegangen werden muss, dass sich die Strategien und Aktionen von Agenten über die Zeit der sich ständig ändernden Umgebung anpassen. Zusammenfassend soll hier also die dezentrale Koordination und Steuerung von kooperativen autonomen physikalischen Agenten unter expliziter Berücksichtigung dynamischer, der wechselnden Umgebung adaptierten Einzel- und Teamstrategien gegnerischer autonomer physikalischer Agenten und Teams entwickelt werden.

### 3.5 Untersuchungen am Menschen

Untersuchungen am Menschen werden nicht durchgeführt.

### **3.6 Untersuchungen am Tierversuche**

Tierversuche werden nicht durchgeführt.

### **3.7 Gentechnologische Experimente**

Gentechnologische Experimente werden nicht durchgeführt.

## 4 Beantragte Mittel

### 4.1 Personalbedarf

#### 4.1.1 Zwei Wissenschaftliche Mitarbeiter

Wie bereits in Abschnitt 3.2 dargestellt, soll ein Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich „Intelligente Systeme“ mit besonderer Qualifikation auf dem Gebiet der Multiagentensysteme die Arbeitspakete AP2.6-AP2.8, AP3.2, AP3.3, AP4.3, AP5.2 und AP5.3 bearbeiten. Ein zweiter Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich „Kognitive Robotik“ soll die Arbeitspakete AP2.1-AP2.5, AP3.1, AP4.2 und AP5.1 angehen, wozu er besondere Qualifikationen in Robotik und Bildverarbeitung benötigt. Die integrierenden Arbeitspakete AP1, AP2.9, AP3.4, AP4.1, AP4.4, AP5.4 und AP6 werden von beiden Wissenschaftlern gemeinsam bearbeitet. In Anbetracht der Komplexität der Aufgabenstellungen und der aktuellen Arbeitsmarktlage für Informatiker werden für beide jeweils ganze Stellen beantragt.

*zwei Stellen BAT IIa für 2 Jahre*

#### 4.1.2 Studentische Hilfskräfte

Die studentischen Hilfskräfte sollen die Einrichtung und Wartung der Experimentalroboter übernehmen sowie Programmierarbeiten im Bereich Künstliche Intelligenz durchführen. Jeder beantragte Wissenschaftliche Mitarbeiter soll durch zwei studentische Hilfskräfte unterstützt werden.

*vier stud. Hilfskräfte (19 Std./Woche) für 2 Jahre*

### 4.2 Wissenschaftliche Geräte

Für eine Teilnahme an der Sony-Legged-League wird ein Team von drei Robotern und einem Ersatzspieler benötigt. Diese Konfiguration erlaubt auch ein Spiel von zwei gegen zwei. Der Sony-Roboter „AIBO“ wird im Dezember in einer neuen Version erscheinen, die auch mit einem Funknetzwerk ausgestattet werden kann. Die Preise für diese Komponenten, insbesondere in der RoboCup-fähigen Version, sind bisher unbekannt. Daher werden hier – unter der Annahme, dass der neue Roboter mit Funk-LAN nicht teurer wird als der alte ohne – die bisher geltenden Preise angesetzt:

Vier Roboter AIBO ERS-210 inkl. Funkverbindung ERA 201P1 (2.500 US\$/Stück)	23.000 DM
Ansteuersoftware (3.500 US\$)	8.000 DM
Spielfeld (4.000 US\$)	9.200 DM
<i>Summe</i>	<i>40.200 DM</i>

### 4.3 Verbrauchsmaterial/Betriebskosten

Ersatzbatterien, Kleinmaterialien für Roboter und Spielfeld, mögliche Reparaturkosten für defekte Roboter, etc.

<i>Summe</i>	<i>6.000 DM</i>
--------------	-----------------

#### 4.4 Reisen

Wie im Rahmenantrag für das Schwerpunktprogramm bereits motiviert wurde, besteht ein erhöhter Reisebedarf für die Mitarbeiter; dies schließt die Antragsteller mit ein. Daher wird die dort vorgesehene Summe von 7.500 DM pro Mitarbeiter und Jahr für Reisen zu Konferenzen zur Präsentation der Forschungsergebnisse und zur Teilnahme an Benchmark-Workshop und sonstigen Schwerpunkt-internen Treffen beantragt.

Reisemittel für 2 Wissenschaftliche Mitarbeiter  $\times$  2 Jahre 2  $\times$  2  $\times$  7.500 DM

*Summe* *30.000 DM*

#### 4.5 Sonstige Kosten

Keine.

## **5 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens**

### **5.1 Zusammensetzung der Arbeitsgruppe**

Die Arbeitsgruppe setzt sich aus zwei (z.B. schon bisher im DFG SPP „Raumkognition“) kooperierenden Teilgruppen zusammen. Folgende Mitarbeiter werden, aus Mitteln der Universität bzw. des Landes Bremen finanziert, teilweise an dem Projekt mitarbeiten:

Prof. Dr. Christoph Schlieder, Dr. Ubbo Visser, Dipl. Inf. Ingo J. Timm,

Prof. Dr. Bernd Krieg-Brückner, Dr. Thomas Röfer.

Im Übrigen tragen ca. 30 Studierende im gemeinsamen studentischen Projekt „Robocup“ in den nächsten zwei Jahren zu dem beantragten Projekt bei.

Mit der Arbeitsgruppe Bildverarbeitung (10 Mitarbeiter) des Antragstellers Schlieder stehen vor Ort fachliche Kompetenz und fertige Softwarelösungen für eventuell auftretende Probleme in diesem Bereich zur Verfügung.

### **5.2 Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern**

#### ***5.2.1 Innerhalb des Schwerpunktprogramms***

Für den Aufbau des Bremer RoboCup-Teams in der Sony-Legged-League wurde eine Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Hans-Dieter Burkhard vereinbart. Eine gemeinschaftliche Weiterentwicklung autonomer Laufmaschinen ist in Hinblick auf das Benchmarking-Szenario RoboCup in enger Zusammenarbeit mit den anderen Gruppen vorgesehen, die Laufmaschinen weiterentwickeln möchten.

Da der Aufbau des eigenen Roboterteams einige Zeit in Anspruch nehmen wird, ist das hier beantragte Projekt auch auf Kooperationen mit in der Middle-Size-League engagierten Arbeitsgruppen aus dem Schwerpunktprogramm angewiesen, um die Bewegungsdaten ihrer Roboterteams analysieren und die entwickelten Methoden validieren zu können. Zu einem späteren Zeitpunkt könnten die gewonnenen Erkenntnisse in diese Teams zurückfließen.

#### ***5.2.2 Außerhalb des Schwerpunktprogramms***

Mit Ausnahme von Dr. Ubbo Visser sind alle Antragsteller im DFG-Schwerpunktprogramm „Raumkognition“ tätig. Dadurch bestehen hier zahlreiche Kooperationen, insbesondere mit der Arbeitsgruppe von Prof. Wilfried Brauer (Technische Universität München) und Prof. Christian Freksa (Universität Hamburg). Auch der Kontakt zu Prof. Bernhard Nebel entstammt diesem Umfeld (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Die Weiterentwicklung des Bremer Autonomen Rollstuhls geschieht in Zusammenarbeit mit der Firma Meyra, der Marktführerin für Rollstühle in Deutschland.

Durch die Mitgliedschaft von Herrn Timm in der Leitung der Fachgruppe „Verteilte Künstliche Intelligenz“ des Fachbereiches „Künstliche Intelligenz“ der Gesellschaft für Informatik e.V. werden neueste Trends aus der Multiagententechnologie auf nationaler und internationaler Ebene in die Arbeiten einbezogen.

### **5.3 Arbeiten im Ausland und Kooperation mit ausländischen Partnern**

International bestehen im Bereich Robotik Kontakte zu den Arbeitsgruppen von Prof. Anibal T. de Almeida (Universität Coimbra, Portugal), Prof. Spyros Tzafestas (Universität Athen, Griechenland) und Dr. Ulrich Nehmzow (Universität Manchester, England), letztere bis Ende 1999 gefördert durch die DAAD im Rahmen des ARC-Programms.

Im Bereich der Intelligenten Systeme besteht eine langjährige Kooperation mit dem Machine Learning Research Centre MLRC (das ehemalige Neurocomputing Research Centre) der Queensland University of Technology. Prof. Dr. Joachim Diederich vom MLRC und Dr. Ubbo Visser arbeiten z. Zt. in zwei Forschungsprojekten zusammen. Weiterhin besteht ein enger Kontakt zum International Knowledge Discovery Institute (IKDI), ein weltweit agierendes Forschungs- und Entwicklungsinstitut, bei dem Dr. Visser Senior Partner ist. Der Bereich Intelligente Systeme kooperiert zudem mit Prof. Dr. Ryszard Michalski vom Machine Learning and Inference Laboratory der George Mason University in Fairfax, VA. Eine weitere Kooperation besteht mit Prof. Mathew Palakal von der Indiana University-Purdue University Indianapolis, U.S.A.

### **5.4 Apparative Ausstattung**

Der Arbeitsgruppe „Kognitive Robotik“ stehen zwei Rollstühle mit Sensorik und On-Board-Rechnern, sowie zahlreiche, für die Lehre eingesetzte Kleinroboterbaukästen zur Verfügung. Der ältere Rollstuhl ist mit 16 Ultraschall-, 6 Infrarot und 14 taktilen Sensoren sowie einer Kamera auf einem Schwenk- und Neigekopf ausgestattet, das neuere Modell „Rolland“ mit 27 Ultraschallsensoren und einem Laser-Entfernungsmesser der Firma Sick. Auf letzterem wird ebenfalls momentan eine Kamera installiert.

Die vorhandene Infrastruktur der Bereiche Intelligente Systeme und Kognitive Robotik des TZI steht zur Nutzung des Projekts zur Verfügung. Hierzu zählen neben zahlreichen Unix-Workstations und PCs auch die Nutzung eines Multi-Prozessor PC-Servers und eines Multi-Prozessor Unix-Servers. Im weiteren wird soweit möglich vorhandene Software genutzt.

### **5.5 Laufende Mittel für Sachausgaben**

Laufende Mittel für Sachausgaben stehen an der Universität Bremen in ausreichendem Maße zur Verfügung.

### **5.6 Sonstige Voraussetzungen**

Keine.

## 6 Wirtschaftliche Verwertung

Der Bremer Autonomen Rollstuhl „Rolland“ ist dem Gebiet der *Service Robotik* zuzuordnen. Dieser Bereich wird nach jüngsten Studien (United Nations Economic Commission for Europe, 1999) in Zukunft zum Wachstumsbereich und bietet große wirtschaftliche Chancen. Eine Bewegungserkennung für den Rollstuhl wird das Fahrverhalten des Systems und damit den Komfort für die Benutzer erheblich verbessern und dadurch die Akzeptanz bei der Zielgruppe weiter steigern, so dass Firmen wie z.B. *Meyra* derartige Systeme marktreif zu Ende entwickeln können. Fest geplant ist eine solche Vermarktung jedoch bisher noch nicht.

Dem elektronischen Handel (E-Commerce) wird gerade im Business-2-Business Bereich ein hohes Potential zugesprochen. Für den Einsatz intelligenter Verfahren müssen geeignete Schutzmechanismen für solche elektronischen Marktplätze entwickelt werden. Bisher ist noch keine konkrete Verwertung des Projektes in diesem Rahmen angedacht, aber es ist möglich und denkbar in Kooperation mit einem Klein- oder Mittelständischen Unternehmen die hier entwickelten Methoden zu effektiven Schutzmechanismen weiterzuentwickeln.

## **7 Erklärungen**

### **7.1**

Es besteht keinerlei thematische Verbindung zwischen dem Vorhaben und Arbeiten in einem am Ort befindlichen Sonderforschungsbereich.

### **7.2**

Ein Antrag auf Finanzierung dieses Vorhabens wurde bei keiner anderen Stelle eingereicht. Wenn einer von uns einen solchen Antrag stellt, wird er die Deutsche Forschungsgemeinschaft unverzüglich benachrichtigen.

### **7.3**

Der Vertrauensdozent der DFG an der Universität Bremen ist über die Antragstellung informiert.

## **8 Unterschriften**

Bremen, den 6. August 2002

(Christoph Schlieder)

(Ubbo Visser)

(Bernd Krieg-Brückner)

(Thomas Röfer)

## **9 Verzeichnis der Anlagen**

Lebensläufe und Veröffentlichungslisten von

- Prof. Dr. Christoph Schlieder
- Dr. Ubbo Visser
- Prof. Dr. Bernd Krieg-Brückner
- Dr. Thomas Röfer