

FZID Discussion Papers

**CC Information Systems and
Communication Technologies**

Discussion Paper 25-2011

QUALITATIVES, RÄUMLICHES SCHLIESSEN ZUR KOLLISIONSERKENNUNG UND KOLLISIONSVERMEIDUNG AUTONOMER BDI-AGENTEN

Michael Schuele, Stefan Kirn

Discussion Paper 25-2011

Qualitatives, räumliches Schließen zur Kollisionserkennung und Kollisionsvermeidung autonomer BDI-Agenten

Michael Schuele, Stefan Kirn

Download this Discussion Paper from our homepage:

<https://fzid.uni-hohenheim.de/71978.html>

ISSN 1867-934X (Printausgabe)
ISSN 1868-0720 (Internetausgabe)

Die FZID Discussion Papers dienen der schnellen Verbreitung von Forschungsarbeiten des FZID. Die Beiträge liegen in alleiniger Verantwortung der Autoren und stellen nicht notwendigerweise die Meinung des FZID dar.

FZID Discussion Papers are intended to make results of FZID research available to the public in order to encourage scientific discussion and suggestions for revisions. The authors are solely responsible for the contents which do not necessarily represent the opinion of the FZID.

Qualitatives, räumliches Schließen zur Kollisionserkennung und Kollisionsvermeidung autonomer BDI-Agenten

Michael Schuele, Stefan Kirn
Universität Hohenheim
Wirtschaftsinformatik 2
70593 Stuttgart

{mschuele, kirn}@uni-hohenheim.de

Zusammenfassung

Die Trends und Veränderungen in der Logistik führen zu einem dezentralen Ansatz der Steuerungssysteme, um die Komplexität logistischer Systeme zu reduzieren. Softwareagenten, insbesondere BDI-Agenten (Belief-Desire-Intention), als Gegenstand dieser Arbeit, bieten aufgrund ihrer Eigenschaften geeignete Konzepte diesen Ansatz umzusetzen. Im räumlichen Kontext ist das Wissen der Agenten über ihre Umwelt häufig unsicher. Dieser Beitrag adressiert das Problem der autonomen, kollisionsfreien Bewegung von mehreren, interagierenden Agenten auf Basis von unsicherem Wissen im Kontext der Transportlogistik. Zu diesem Zweck bietet die Perspektive des qualitativ räumlichen Schließens geeignete Konzepte. Der Ansatz wird durch eine Multiagentensimulation in einem transportlogistischen Szenario, im Speziellen mit verschiedenen organisationstheoretischen Konzepten bezüglich des Verhaltens der Agenten ausgewertet.

Schlüsselwörter

Qualitatives räumliches Schließen, Multiagentensystem, Kollisionserkennung, Kollisionsvermeidung, geographische Informationssysteme, Logistik, Organisationstheorie

1. Einleitung

Logistik ist vor allem durch das Ineinandergreifen logistischer Prozesse geprägt. Daher erfordert effektive Logistik einen ganzheitlichen Ansatz unter Berücksichtigung inter- und intra-prozessualer Abhängigkeiten [9]. Der Ausfall lokaler Ressourcen kann unter Umständen die Ausführung von Logistikprozessen behindern, besonders die Prozesse die diese Ressourcen nutzen. Aufgrund der inter-prozessualen Abhängigkeiten kann dies auch Auswirkungen auf weitere Prozesse haben. Somit sind Teilprobleme auf Ressourcenebene, wie die kollisionsfreie Bewegung von autonomen, transportlogistischen Ressourcen, wie z. B. LKW und Dumper auf einer Baustelle, ebenso für logistische Probleme aus Perspektive der gesamten Wertschöpfungskette relevant.

Die Trends und Veränderungen in der Logistik führen zu einem dezentralen Ansatz der Steuerungssysteme, um die Komplexität logistischer Systeme zu reduzieren [16]. Der

ehemalige zentrale Standardansatz limitierte die Entscheidungsfähigkeit lokaler Einheiten auf einen geringen Handlungsspielraum. Der dezentrale Ansatz adressiert Aspekte wie Heterogenität, Adaptivität und Reaktivität auf sich dynamisch verändernde äußere Einflüsse. Folglich werden lokale Entitäten mit der Fähigkeit auf operativer Ebene dynamisch Entscheidungen zu treffen, benötigt. Ein bekanntes Beispiel für diesen Ansatz ist die verteilte Kontrolle von automatisierten Containerterminals [6].

Softwareagenten sind dabei ein geeigneter Ansatz autonome, verteilte, dezentrale, logistische Softwaresysteme zu repräsentieren [21]. Der *Gegenstand* des Beitrags sind durch BDI-Agenten repräsentierte logistische Ressourcen im Kontext der Transportlogistik, d. h. Transportmittel, die zur Raumüberbrückung bzw. Ortsveränderung von Transportgütern genutzt werden. Vor allem in der in diesem Beitrag hauptsächlich betrachteten räumlichen Dimension müssen logistische Ressourcen adaptiv auf sich dynamisch verändernde Anforderungen, wie verändertes Mobilitätsverhalten anderer Ressourcen, Zielpositionen, Transportwege im Rahmen einer dynamischen Umwelt reagieren. Im räumlichen Kontext ist das Wissen der Agenten über ihre Umwelt häufig unsicher. Agenten können ihre Entscheidungen aufgrund der Dynamik ihrer Umwelt nicht auf Basis statischer Informationen treffen. Diese Arbeit adressiert das *Problem* der autonomen, kollisionsfreien Bewegung von mehreren, interagierenden Agenten auf Basis von unsicherem Wissen im Kontext der Transportlogistik. Zu diesem Zweck bietet die *Perspektive* des qualitativen räumlichen Schließens auf der Basis des Region Connection Calculus geeignete Konzepte [26].

In Vorarbeiten wurde die Grundidee bereits motiviert [32], wobei den Agenten in dieser Vorarbeit keine Interaktionsmechanismen im Sinne von Kommunikation zur Verfügung standen. Im vorliegenden Beitrag wird das formale Agentenmodell um Interaktionsmechanismen zur Etablierung organisationaler Einheiten (Team, Hierarchie) zwischen den Agenten und deren Evaluation erweitert. Sensortechnologie, die für ein reales Szenario erforderlich wäre, wird nicht berücksichtigt.

Im Detail werden die BDI-Agenten mit räumlichen Analysefunktionen ausgestattet, d. h. Standardfunktionen des OpenGIS-Standard [20] werden in eine Agentenumgebung integriert. Die Umwelt wird durch thematische Schichten auf Basis von realen geographischen Daten repräsentiert. Darüber hinaus erhalten die Agenten die Fähigkeit über Interaktionen zu kooperieren um sich zu koordinieren, was zu Einschränkungen bzgl. der Eigenschaft der Autonomie führen kann. Eine Multiagentensimulation evaluiert das vorgestellte Agentenmodell im Speziellen im Bezug auf Einflussgrößen und Einsichten zu organisatorischen Phänomenen in einem transportlogistischen Szenario. Nach Picot und Baumann [22] stellt sich im Allgemeinen die Frage nach der Gestaltung von Organisationen und den sich in signifikanter Weise gegenseitig beeinflussenden zugehörigen Informations- und Kommunikationssystemen. In diesem Beitrag werden im Rahmen der Evaluation Experimente mit verschiedenen Organisationsstrukturen der Agenten durchgeführt und im Speziellen auf ihre Einflussnahme in der Dimension Raum analysiert.

Die Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut. Der Stand der Forschung wird in Kapitel 2 diskutiert. Kapitel 3 entwickelt den Ansatz, der BDI-Agenten befähigt qualitativ räumlich

zu schließen und die zugehörige Systemarchitektur. In Kapitel 4 wird der Lösungsansatz evaluiert und es werden Handlungsempfehlungen für die Organisationsstruktur von Multiagentensystemen abgeleitet (ökonomische Implikationen). Kapitel 5 enthält ein Resümee und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschung.

2. Stand der Forschung

2.1 Verwandte Arbeiten

Im Folgenden werden die für diesen Beitrag relevanten Arbeiten vorgestellt. Diese lassen sich im Wesentlichen in vier Kategorien einteilen: (1) Ansätze basierend auf Kalkülen, (2) Ansätze aus dem Umfeld der Robotik, (3) logistische Lösungen und (4) organisationstheoretische Ansätze.

Die Anwendung von räumlichen Kalkülen im Kontext kollisionsfreier Bewegung wird bereits von mehreren Ansätzen aufgegriffen. Die Beiträge [29] und [33] untersuchen analog zu diesem Beitrag die Integration von Methoden des qualitativen räumlichen Schließens und Softwareagenten. Schuldt und Gottfried [29] verwenden ein räumliches Kalkül auf Basis von 23 Basisrelationen und evaluieren den Beitrag im Rahmen einer Fallstudie. Die Autoren bleiben auf einer hohen Abstraktionsebene, so dass keine Informationen über das konkrete Agentenmodell gegeben werden. Der Beitrag legitimiert dennoch die Art des Ansatzes. Trotz der Vergrößerung der qualitativen Repräsentation von den zugrundeliegenden quantitativen Daten lassen sich die relevanten Situationen klar unterscheiden. In [33] verwenden Wolter et al. einen Ansatz, der die kontinuierliche, kollisionsfreie Bewegungen von Schiffen in einem Szenario auf dem offenen Meer durch Softwareagenten simuliert. Sie formalisieren, für diesen Beitrag übertragbare, Verkehrsregeln durch das $OPRA_m$ Kalkül, das die Beziehungen zwischen Punkten beschreibt. Der Beitrag beinhaltet ebenfalls keine Informationen im Hinblick auf die Agentenmodelle. Bezüglich der für diesen Beitrag relevanten Eigenschaft der Autonomie von Agenten lässt sich durch die zentrale Perspektive des Spatial Reasoning-Prozesses nichts ableiten. Eine Auswertung der beiden Beiträge zeigt, dass sich räumliche Kalküle zur Interpretation von Verkehrssituationen für die Bewegung von verteilten Entitäten eignen. Für die Wahl des Kalküls dieses Beitrags ergibt sich durch die Auswertung, dass aus Komplexitätsgründen ein Kalkül mit weniger Basisrelationen sinnvoll ist, solange die relevanten Situationen erkannt werden.

Die Problemklasse der Motion Planning Probleme [17] aus dem Umfeld der Robotik adressiert ähnliche Fragestellungen. Insbesondere das Path Planning Problem von multiplen mobilen Robotern in einer Umgebung diskutiert relevante Ansätze. Die vorhandenen Techniken lassen sich in drei Unterkategorien unterteilen: zentrale, entkoppelte und dezentrale Ansätze. Die letztgenannte Kategorie hat die engste Beziehung zu diesem Beitrag. In [18] ist das Problem der dezentralen Multiroboter Bewegungsplanung als ein Maze-Searching Problem formuliert. Der Schwerpunkt der Beitrages von Lumelsky und Harinarayan [18] und des Beitrags von Chun et al. [4] liegt auf algorithmischen Fragenstellungen der dezentralen Entscheidungsprozesse. Die Autoren beider Beiträge ignorieren potentielle in realer Umgebung auftretende Unsicherheiten bei den Inputinformationen – sie setzen die genaue Kenntnis und perfekte Sensorik innerhalb eines reaktiven Ansatzes voraus. Da sich dieser Beitrag mit der Unsicherheit bzgl. dynamischen

Veränderungen der Umwelt der Agenten befasst, werden ebenso Unsicherheiten bei den Inputinformationen ausgeschlossen. Jäger und Nebel [11] und Clark et al. [5] folgen ebenfalls einem dezentralen Ansatz. Kollisionen zwischen Robotern in einem vordefinierten Wahrnehmungsbereich werden durch die Bildung von Gruppen abgefangen, was einen ersten, vereinfachten Ansatz für das organisationstheoretische Konzept dieser Arbeit darstellt. Die Auswertung der Beiträge zeigt, dass eine paarweise Abstimmung zwischen den Agenten zweckmäßig ist, so dass dieser Art von Koordination in diesem Beitrag weiterverfolgt wird.

Automated Guided Vehicles (AGV) kommen in heutigen Intra-Logistikszenerarien wie Containerterminals häufig zum Einsatz um Transportaufgaben durchzuführen. Mehrere Beiträge (z. B. [14], [7] und [19]) verwenden diese Technologie in zentralisierten Ansätzen, die eine Kontrolle über einen Operations Research-Ansatz erfordern. Diese Beiträge und der Einsatz von AGV in industriellen Szenarien legitimieren den Wunsch nach sich autonom, bewegenden logistischen Ressourcen. Dennoch ist durch den zentralen Ansatz, die Eigenschaft der Autonomie nicht gewährleistet. Dies gilt vor allem für Szenarien, in denen logistische Ressourcen unterschiedlichen Marktteilnehmern zugeordnet sind. In diesem Beitrag gewährleistet ein agentenbasierter Ansatz eine Abbildung der dezentrale Situation und somit eine Autonomie der Entitäten.

Sowohl Horling und Lesser [10] als auch Kirn [15] untersuchen organisationstheoretische Ansätze in Multiagentensystemen. Horling und Lesser [10] präsentieren einen Überblick über organisatorische Strukturen in Multiagentensystemen. In [15], gibt Kirn einen historischen Abriss über kooperierende intelligente Softwareagenten. Beide Beiträge kommen zu dem Ergebnis, dass das Organisationsdesign signifikanten Einfluss auf die Performance des Gesamtsystems hat. Des Weiteren müssen für den effektiven Einsatz von Informationssystemen reale Organisationsstrukturen durch die eingesetzte Software abgebildet werden können.

2.2 Deliberative Agenten

Das Paradigma der BDI-Architektur (Belief-Desire-Intention) für Softwareagenten basiert auf den Konzepten Wissen (*beliefs*), Wünschen bzw. Ziele (*desires*) und Intentionen (*intentions*) und dem von Bratman entwickelten Ansatz des praktischen Schließens [2], d. h. dem Entscheidungsprozess welche Aktionen zur Erreichung der Ziele der Agenten durchgeführt werden. Das praktische Schließen besteht aus zwei Aktivitäten der Deliberation und dem Means-Ends Reasoning. Deliberation bezeichnet dabei den Entscheidungsprozess, welche Ziele erreicht werden sollen, das Means-Ends Reasoning den Entscheidungsprozess, auf welche Art und Weise diese Ziele erreicht werden sollen [34].

Im Kontext des Deliberationprozesses bestimmt eine Funktion die für den Agenten erreichbaren Ziele auf Basis der aktuellen *beliefs* und *intentions*. Eine Menge an Optionen repräsentiert die möglichen Aktionen des Agenten. Das Means-End Reasoning des Agenten wird mit Hilfe einer Filterfunktion, welche die Intentionen des Agenten auf Basis der aktuellen *beliefs*, *desires* und *intentions* festlegt, durchgeführt. Eine Menge an Intentionen repräsentiert den aktuellen Fokus, d. h. die Zustände die erreicht werden sollen. Eine

Auswahlfunktion bestimmt auf Basis der ausgewählten Intentionen die Aktionen die ausgeführt werden sollen.

2.3 Qualitativ räumliches Schließen

Das Repräsentieren und Analysieren von räumlichen Informationen ist ein wesentliches Problem im Kontext der Umwelt von Multiagentensystemen (MAS) [30][31]. Oft liegen räumliche Informationen nur qualitativ vor, oder eine Verarbeitung großer Datenmengen fordert eine effiziente Analyse in qualitativer Form. Ein Ansatz, der Region Connection Calculus (RCC) für qualitativ räumliches Schließen, wurde von Randell, Cui und Cohn entwickelt [26]. Dieser basiert auf binären topologischen Beziehungen. Räumliche Objekte sind definiert als reguläre Teilmengen eines topologischen Raumes U . Alle Beziehungen zwischen zwei räumlichen Objekten r und s werden auf Basis der Relation $C(r,s)$ beschrieben. $C(r,s)$ ist wahr falls sich die Hüllen der beiden räumlichen Objekte in einem Punkt berühren. Die in diesem Beitrag angewandte Variante dieses Kalkül, der RCC-8, basiert auf acht gemeinsam erschöpfenden und paarweise disjunkten Relationen, welche die topologischen Relationen zwischen zwei räumlichen Objekten beschreiben. Die Basisrelationen des RCC-8 sind DC (*disconnected*), EC (*externally connected*), PO (*partial overlap*), EQ (*equal*), TPP (*tangential proper part*), NTPP (*non-tangential proper part*), TPP⁻¹ (*tangential proper part inverse*) und NTPP⁻¹ (*non-tangential proper part inverse*). DC(x,y) ist beispielsweise folgendermaßen definiert:

$$DC(x,y) \equiv_{\text{def}} \neg C(x,y)$$

Alle acht Basisrelationen, welche in Abbildung 1 graphisch veranschaulicht sind, werden in ähnlicher Weise abgeleitet.

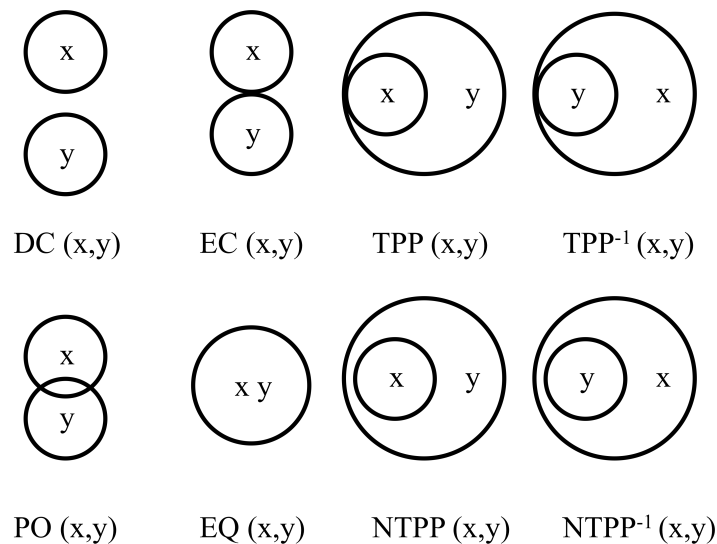


Abbildung 1. Graphische Darstellung der acht Basisrelationen des RCC-8

Formeln werden in diesem Zusammenhang mit xRy beschrieben, wobei R eine Basisrelation ist. Formal werden die Operationen \cup (*union*), $-$ (*converse*), \cap (*intersection*) und \circ (*composition*) wie folgt definiert:

$$\forall x,y : x(R \cup S)y \leftrightarrow xRy \vee xSy$$

$$\forall x,y : x(R \cap S)y \leftrightarrow xRy \wedge xSy$$

$$\forall x,y : x(R -)y \leftrightarrow yRx$$

$$\forall x,y : x(R \circ S)y \leftrightarrow \exists z : (xRz \wedge zSy)$$

Schlussfolgerungen werden durch die Komposition (\circ) der Basisrelationen errechnet. Tabelle 1 zeigt alle Kompositionen der acht Basisrelationen [28].

Tabelle 1. Kompositionstabelle des RCC-8 [28]

\circ	DC	EC	PO	TPP	NTPP	TPP ⁻¹	NTPP ⁻¹	EQ
DC	*	DC, EC, PO, TPP, NTPP	DC, EC, PO, TPP, NTPP	DC, EC, PO, TPP, NTPP	DC, EC, PO, TPP, NTPP	DC	DC	DC
EC	DC, EC, PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	DC, EC, PO, TPP, TPP ⁻¹ , EQ	DC, EC, PO, TPP, NTPP	EC, PO, TPP, NTPP	PO, TPP, NTPP	DC, EC	DC	EC
PO	DC, EC, PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	DC, EC, PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	*	PO, TPP, NTPP	PO, TPP, NTPP	DC, EC, PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	DC, EC, PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	PO
TPP	DC	DC, EC	DC, EC, PO, TPP, NTPP	TPP, NTPP	NTPP	DC, EC, PO, TPP, TPP ⁻¹ , EQ	DC, EC, PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	TPP
NTPP	DC	DC	DC, EC, PO, TPP, NTPP	NTPP	NTPP	DC, EC, PO, TPP, NTPP	*	NTPP
TPP⁻¹	DC, EC, PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	EC, PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	PO, EQ, TPP, TPP ⁻¹	PO, TPP, NTPP	TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	NTPP ⁻¹	TPP ⁻¹
NTPP⁻¹	DC, EC, PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	PO, TPP ⁻¹ , NTPP ⁻¹	PO, TPP ⁻¹ , NTPP, NTPP ⁻¹ , EQ	NTPP ⁻¹	NTPP ⁻¹	NTPP ⁻¹
EQ	DC	EC	PO	TPP	NTPP	TPP ⁻¹	NTPP ⁻¹	EQ

2.4 Auswertung

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz soll es BDI-Agenten ermöglichen, sich in einer zwei-dimensionalen räumlichen Umgebung autonom und kollisionsfrei zu bewegen. Die räumliche Umgebung (Umwelt) der Agenten basiert auf einem digitalen Geländemodell realer, geographischer Daten. Es gibt Regionen in denen sich ein Agent bewegen darf, Regionen in denen sich der Agent nicht bewegen darf und es existieren Hindernisse. Die Aufgabe der Agenten wird durch die Bereiche der Kollisionserkennung und Kollisionsvermeidung repräsentiert. Für die Erkennung von Kollisionen gilt, dass folgende Situationen für die Berechnung der nächsten Position eines Agenten niemals zugelassen werden dürfen: (1) $p_{Agent1} \neq p_{Agent2}$, d. h. zwei Agenten dürfen sich niemals auf der gleichen Position befinden, (2) $p_{Agent} \notin ObstacleArea$, ein Agent darf sich niemals auf der Fläche einer Hindernisregion befinden und (3) $p_{Agent} \subset MovementArea$, ein Agent darf sich auf der für die Bewegung ausgewiesenen Region befinden. Die Kollisionsvermeidung, d. h. die kollisionsfreie Bewegung der Agenten unter Einbezug der Ergebnisse aus der Kollisionserkennung, folgt auf Basis einer Bewegungsstrategie mit Ziel den möglichst kürzesten Weg zwischen der Startposition p_1 und Zielposition p_2 zurückzulegen, d. h. $Min(Distanz(p_1, p_2))$. Zur kooperativen Abstimmung der Bewegungsstrategien der einzelnen Agenten werden Interaktionsmöglichkeiten benötigt.

3. Qualitativ räumliches Schließen mit BDI-Agenten

3.1 Agentenmodell

Im Rahmen des Deliberationsprozesses der Agenten lassen sich die Anforderungen auf die zwei sich wechselseitig beeinflussende Ziele übertragen: (1) sich zu einer Zielposition zu bewegen und (2) Kollisionen mit Hindernissen und anderen Agenten zu vermeiden. Wenn der Agent die Zielposition erreicht hat wird eine neue Zielposition festgelegt und der Agent beginnt erneut sich zu bewegen. Zur formalen Beschreibung des Agenten wird AgentSpeak(L) verwendet [27]. Das Agentenmodell ist unter der Bedingung entwickelt worden, dass es von Jason [1], einem Java-basierten Interpreter für eine erweiterte Version von AgentSpeak(L), akzeptiert wird. Die folgenden AgentSpeak(L)-Codeausschnitte beschränken sich auf die relevanten Teile.

Der Agent besitzt die folgende Menge an *beliefs*. Das *belief agent_id* wird als eindeutiges Identifikationsmerkmal des Agenten verwendet. *speed* bezeichnet die Geschwindigkeit des Agenten. Die zu erreichende Zielposition wird durch die Koordinaten *target_position_x* und *target_position_y* repräsentiert, die aktuelle Position durch *current_position_x* und *current_position_y* und die für den nächsten Schritt berechnete Position durch *calculated_position_x* und *calculated_position_y*. Das *belief expansion* gibt den Ausdehnungsradius des Agenten, so dass der Agent nicht nur als Punkt sondern als Polygon repräsentiert wird. Der *perception_factor* gibt an in welchem Radius der Agent die Umgebung in der er sich befindet wahrnimmt. Diese Region wird durch das *belief perception_area* repräsentiert. Das *belief movement_area* repräsentiert die Regionen in der sich der Agent bewegen darf, *obstacle_area* die Regionen die Hindernisse darstellen. Das *belief rcc8_movement_area_relation* gibt an, in welcher der acht Basisrelationen des RCC-8 sich *perception_area* zu *movement_area* befindet. Analog dazu gibt *rcc8_obstacle_area_relation* an, in welcher der acht Basisrelationen sich *perception_area*

zu *obstacle_area* befindet. *angle* bezeichnet den Richtungswinkel für die Bewegung relativ zum Koordinatensystem. *priority* repräsentiert innerhalb der Kooperationsmechanismen der Agenten die Hierarchiestufe des Agenten.

/ Initial beliefs */*

agent_id(ID).

speed(S).

target_position_x(TX).

target_position_y(TY).

current_position_x(CUX).

current_position_y(CUY).

calculated_position_x(CAX).

calculated_position_y(CAY).

expansion(E).

perception_factor(PF).

perception_area(PA).

movement_area(MA).

obstacle_area(OA).

rcc8_movement_area_relation(RMR).

rcc8_obstacle_area_relation(ROR).

angle(A).

priority(PRIO).

Das initiale Ziel ist *start*. Bei Aktivierung des Ereignisses wird eine Funktion *register_at_environment* ausgeführt, die den Agenten in der Umwelt registriert. Die Repräsentationen der Agenten in der Umwelt werden als dynamische Hindernisse interpretiert. *start* generiert ebenfalls das Ziel *move*.

/ Initial goals */*

!start.

/ Plans */*

+!start: true <-

register_at_environment(ID, CUX, CUY, CAX, CAY, E, PF);

!move(PA, A).

Die Aktivitäten die durch *move* getriggert werden, stellen den eigentlichen Beginn des Prozesses dar. Zunächst wird das Ziel *calculate_new_position* generiert.

+!move(PA, A): <-

!calculate_new_position(PA, A).

calculate_new_position führt die gleichnamige Funktion *calculate_new_position* aus, welche die neue Position für den Agenten mit Hilfe des Winkels und der Geschwindigkeit berechnet. Der initiale Winkel berechnete sich aus der aktuellen Position und der Zielposition, so dass zunächst der direkte Weg favorisiert wird. Die neu berechnete Position und das den Agenten auf dieser Position repräsentierende Polygon befinden sich immer in

der aktuellen Wahrnehmungsregion. Nach der Berechnung wird das Ziel *avoid_collision* generiert.

```
+!calculate_new_position(PA, A): true <-
  calculate_new_position(CUX, CUY, TX, TY, S, E, A, CAX, CAY);
  !avoid_collision(PA, A).
```

avoid_collision führt drei Funktionen aus, die es dem Agenten ermöglichen qualitativ räumlich zu schließen. Die Funktion *detect_spatial_relations_for_movement* berechnet die RCC-8-Basisrelation zwischen der Wahrnehmungsregion und den Regionen auf denen sich der Agent bewegen darf. Die Funktion *detect_spatial_relations_for_obstacle* berechnet die RCC-8-Basisrelation zwischen der Wahrnehmungsregion und den Hindernisregionen wie z. B. statische Hindernisse und andere Agenten.

Die Funktion *reason_spatial_composition* führt das eigentliche Schließen durch, d.h. es wird ermittelt ob sich die neu berechnete Position in einer Region befindet auf der sich der Agent bewegen darf und sich nicht in einer Hindernisregion befindet bzw. sich nicht mit dieser überschneidet. Für das Polygon das den Agenten an der neu berechneten Position repräsentiert, kann, wie oben beschrieben, angenommen werden, dass es sich in der Wahrnehmungsregion befindet. Formal wird diese Relation mit der RCC-8-Basisrelation NTPP beschrieben. Somit kann mit Hilfe der Kompositionstabelle des RCC-8 auf die möglichen Basisrelationen zwischen der neuen Position des Agenten, den Bewegungsregionen und den Hindernisregionen geschlossen werden. Für die Bewegungsregionen ergibt eine Auswertung der geschlossenen Basisrelationen, dass falls die Menge DC, EC, TPP^{-1} , PO oder $NTPP^{-1}$ enthält, ist eine potentielle Kollision vorhanden. Für die Hindernisregionen ergibt eine Auswertung der geschlossenen Basisrelationen, dass falls die Menge TPP, TPP^{-1} , PO, EQ, NTPP oder $NTPP^{-1}$ enthält, ist eine potentielle Kollision vorhanden. Bei vorhandener Kollision wird anhand einer Strategie die Wahrnehmungsregion verkleinert und bzw. oder der Bewegungswinkel verändert um in der nächsten Iteration zu einem kollisionsfreien Ergebnis zu kommen. Für den Fall der Kooperation zwischen den Agenten bzgl. der Bewegungsstrategie wird das Ziel *send_message* erzeugt. Als letzte Aktivität generiert *avoid_collision* das Ziel *move_to_position*.

```
+!avoid_collision(PA, A): true <-
  detect_spatial_relations_for_movement(ID, PA, RMR, MA);
  detect_spatial_relations_for_obstacle(ID, PA, ROR, OA);
  reason_spatial_composition(ID, RMR, ROR, PA, MA, OA, CUX, CUY, CAX, CAY, TX,
  TY, S, E, A, CA PAOUT, AOUT, RC, ME, AC, PRIO);
  -+collision(CA);
  -+agent_collision(AC);
  !send_message(RC, ME, ID, A, GX, GY, CUX, CUY);
  !move_to_position(PA, MA, OA, A).
```

Die folgenden beiden AgentSpeak(L)-Abschnitte werden getriggert auf Grund einer Änderung eines *beliefs*. Falls das Ergebnis des vorherigen Plans *collision(0)* ist, glaubt der Agent *-avoided(collision)*, falls *collision(1)*, glaubt der Agent *+avoided(collision)*.

```
+collision(0) : true <-  
-avoided(collision).
```

```
+collision(1) : true <-  
+avoided(collision).
```

Im speziellen Fall der potentiellen Kollision mit einem anderen Agenten wird analog zum vorherigen Abschnitt *-send(message)* bzw. *+send(message)* bzgl. des Sendens einer Nachricht gesetzt.

```
+agent_collision(0) : true <-  
-send(message).
```

```
+agent_collision(1) : true <-  
+send(message).
```

send_message führt das eigentliche Senden der Nachricht durch. Es werden Parameter wie die aktuelle Position, die Zielposition und der Bewegungswinkel versendet.

```
+!send_message(RC, ME, ID, A, GX, GY, CUX, CUY): send(message) <-  
.send(RC,tell,content(ME,ID, A, GX, GY, CUX, CUY)).
```

msg wird beim Erhalt einer Nachricht ausgeführt. *interpret_message* verarbeitet die erhaltenen Informationen und nimmt je nach Kooperationsvariante Modifikationen an Parametern wie z. B. der Geschwindigkeit bzw. des Bewegungswinkels vor. Für eine mögliche Rückantwort wird das Ziel *send_message* erneut aktiviert.

```
+msg(ME,IID, IA, IGX, IGY, ICUX, ICUY): true <-interpret_message(ME,IID, IA, IGX,  
IGY, ICUX, ICUY, A, GX, GY, CUX, CUY, S, MEOUT, SR, RCOUT, PRIO, AOUT,  
SOUT);  
-+send_request(SR);  
!send_message(RCOUT, MEOUT, ID, AOUT, GX, GY, CUX, CUY).
```

send_request(0) bzw. *send_request(1)* setzt *-send(message)* bzw. *+send(message)* bzgl. des Versendes einer Rückantwort.

```
+send_request(0) : true <-  
-send(message).
```

```
+send_request(1) : true <-  
+send(message).
```

Der folgende Plan wird getriggert, falls für die durch die Funktion *reason_spatial_composition* neu berechnete Position keine potentielle Kollision existiert. Die Funktion *move_to_calculated_position* führt die eigentliche Bewegung durch, d. h. die neu berechnete Position wird zur aktuellen Position des Agenten. Die Wahrnehmungsregion wird aufgrund der neuen Position neu berechnet. Ein belief *at_target_position* wird gesetzt und gibt an ob die Zielposition erreicht wurde. Die Ziele *change_target_position* und *move* werden aktiviert, so dass eine neue Iteration der Bewegung stattfinden kann.

```
+!move_to_position(PA, MA, OA, A): avoided(collision) <-  
  move_to_calculated_position(ID, PA, MA, OA, CUX, CUY, CAX, CAY, TX, TY, PF, E, A,  
  S, PR);  
-+at_target_position(PR);  
!change_target_position;  
!move(PA, A).
```

Falls für die neu berechnete Position eine potentielle Kollision stattfindet, muss *calculate_new_position* mit der modifizierten Wahrnehmungsregion und dem neuen Bewegungswinkel erneut durchgeführt werden.

```
+!move_to_position(PA, MA, OA, A): not avoided(collision) <-  
  !calculate_new_position(PA, A).
```

Falls das Ergebnis des vorherigen Plans *at_target_position(0)* ist, glaubt der Agent *reached(target_position)*, falls *at_target_position(1)*, glaubt der Agent *+reached(target_position)*.

```
+at_target_position(0): true <-  
-reached(target_position).
```

```
+at_target_position(1): true <-  
+reached(target_position).
```

Der folgende Plan wird getriggert, falls die Zielposition erreicht wurde. Eine neue Zielposition kann gesetzt werden.

```
+!changeTargetPosition: reached(target_position) <-  
  change_target_position(TX, TY).
```

3.2 Geographische Analyse

Die Umwelt, welche die Agenten wahrnehmen, wird aus der Umgebung und anderen Agenten gebildet. Die Umgebung ist für alle sich im System befindlichen Agenten gleich. In diesem Beitrag wird die Umgebung auf einen zwei-dimensionalen Raum beschränkt. Die Datenstruktur basiert auf thematischen Schichten, die als Tabellen realisiert sind in denen sich geometrische Objekte befinden. Geometrische Objekte sind analog zu den Typen der Simple Feature Specification for SQL des OpenGIS Consortium [20] definiert. In diesem Modell werden für die räumliche Repräsentation der Objekte Polygone und Multipolygone verwendet. Die Daten basieren auf realweltlichen Koordinaten. Durch diese vektorbasierte Darstellung der Entitäten erhält man ein kontinuierliches Umgebungsmodell. Thematisch werden für die Problemstellung dieses Beitrags die Polygonschichten explizit als Hindernis bzw. Bewegungsregion ausgewiesen. Für die einzelnen Schichten ist es nicht relevant ob die Objekte statisch oder dynamisch sind. Die Planung der Agenten stützt sich auf eine Momentaufnahme des aktuellen Zustands der wahrgenommenen Umwelt. Die Wahrnehmung der Agenten beschränkt sich auf eine definierte Wahrnehmungsregion in der Umgebung ihres Standortes.

Für die Nutzung des RCC-8 werden Regionen als Polygone bzw. Multipolygone definiert. Eine Basisrelation wird zwischen Polygonen bzw. Multipolygonen ermittelt. Zur

Durchführung dieser Analyse werden die durch die Simple Feature Specification for SQL zur Verfügung gestellten topologischen Funktionen und räumlichen Analysefunktionen verwendet. Mit Hilfe dieser Funktionen kann eine eindeutige Festlegung der Basisrelation zwischen zwei Polygonen bzw. Multipolygonen, wie in Tabelle 2 gezeigt, stattfinden.

Im Detail werden die Relationen zweier geometrischer Objekte A und B analysiert. Die hierbei verwendeten topologischen Funktionen sind *Contains*, *Touches*, *Intersects*, *Within*, *Equals*, *Disjoint*, und *Overlaps*. *Contains* prüft ob das Objekt A Objekt B räumlich vollständig beinhaltet und sich kein Punkt von B auf dem Rand von A befindet. *Touches* ist wahr, wenn die Ränder von Objekt A und Objekt B mindestens einen gemeinsamen Punkt besitzen, die Innenräume sich aber nicht überschneiden. *Intersects* prüft, ob sich zwei geometrische Objekte überschneiden. *Within* ist wahr, wenn das Objekt B Objekt A räumlich vollständig beinhaltet. *Equals* gibt an, ob zwei geometrische Objekte identisch sind. *Disjoint* prüft, ob zwei Objekte keinen gemeinsamen Punkt haben. *Overlaps* ist wahr, falls zwei geometrische Objekte sich überschneiden, sich aber nicht vollständig beinhalten. Zur eindeutigen Bestimmung der Basisrelation ist die Anwendung weiterer räumlicher Analysefunktionen notwendig. *GeometryType(Intersection(A, B))* gibt den Datentyp des geometrischen Objektes zurück das sich aus der Überschneidung zweier geometrischer Objekte ergibt. *Touches(Boundary(A), B)* ist wahr, falls der Rand des Objektes A das Objekt B in mindestens einem Punkt berührt.

Um als eine der Basisrelationen des RCC-8 interpretiert zu werden, müssen alle Werte der jeweiligen Spalte in Tabelle 2 erfüllt sein. Um das qualitativ räumliche Schließen zu ermöglichen, muss die Kompositionstabelle, wie in Tabelle 1 gezeigt, implementiert werden.

Tabelle 2. Topologische und räumliche Analyse zur Festlegung der Basisrelationen des RCC-8

	DC	EC	TPP	TPP ⁻¹	PO	EQ	NTPP	NTPP ₁
Contains(A, B)	false	false	false	true	false	true	false	true
Touches(A, B)	false	true	false	false	false	false	false	false
Intersects(A,B)	false	true	true	true	true	true	true	true
Within(A, B)	false	false	true	false	false	true	true	false
Equals(A, B)	false	false	false	false	false	true	false	false
Disjoint(A, B)	true	false	false	false	false	false	false	false
Overlaps(A, B)	false	false	false	true	true	false	false	false
GeometryType(Intersection(A, B))	Geometry-Collection	Point/Line-String	Polygon	Polygon	Polygon	Polygon	Polygon	Polygon
Touches(Boundary(A), B)	false	true	false	true	false	true	false	false
Touches(Boundary(B), A)	false	true	true	false	false	true	false	false

3.3 Architektur

Die Architektur ist an den Grundprinzipien eines geografischen Informationssystems (GIS) ausgerichtet und integriert räumliche Konzepte in ein Multiagentensystem. Geographische Informationssysteme bieten Funktionen, die geographische Daten aus der realen Umwelt

erfassen, speichern, analysieren und visualisieren [3][8]. Abbildung 2 zeigt ein UML-Komponentendiagramm der Systemarchitektur dieses Ansatzes. Die AgentEnvironment-Komponente basiert auf einem, um räumliche Funktionen erweiterten Datenbanksystem und bietet Schnittstellen für die Interaktion mit den anderen Komponenten. Die räumliche Datenbank ist konform zum OpenGIS-Standard [20], der die Speicherung und Analyse geometrischer Objekte unterstützt. Analog zum thematischen Ansatz für die Speicherung von raumbezogenen Daten existiert für jede der Schichten (AgentLayer, ObstacleLayer, MovementLayer) eine Datenbanktabelle.

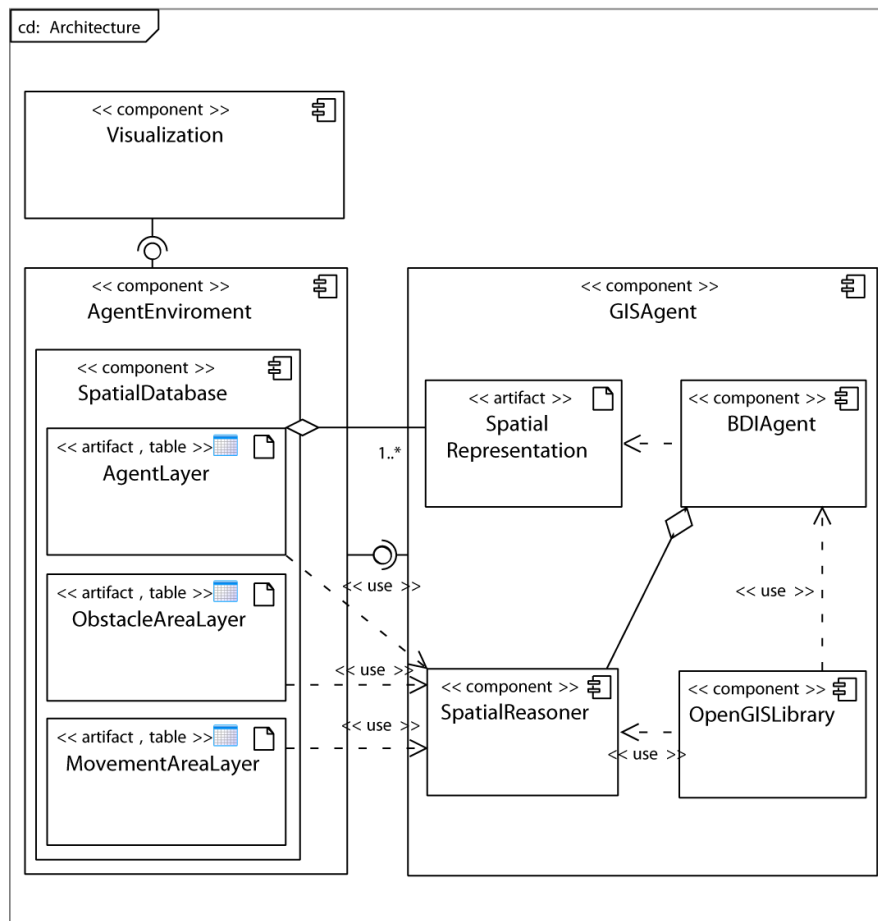


Abbildung 2. UML-Komponentendiagramm der Systemarchitektur

Die GISAgent-Komponente besteht aus dem BDIAgent mit seinem SpatialRepresentation-Artefakt und der SpatialReasoner-Komponente. Die SpatialReasoner-Komponente implementiert die RCC-8 Kompositionstabelle und analysiert die räumlichen Daten aus der AgentEnvironment-Komponente mit räumlichen Funktionen der OpenGISLibrary-Komponente. Die OpenGISLibrary-Komponente bietet Funktionen zur Analyse raumbezogener Daten konform zum OpenGIS-Standard. Das SpatialRepresentation-Artefakt stellt das, den Agenten repräsentierende geometrische Objekt dar. Die Tabelle

AgentLayer der AgentEnvironment-Komponente ist eine Komposition aus allen SpatialRepresentation-Artefakten der beteiligten Agenten.

Die Visualization-Komponente stellt die räumlichen Daten der AgentEnvironment-Komponente analog zu der darunter liegende Schichtenstruktur dar (Abbildung 3). Ein iteratives Update sichert die Aktualität der Darstellung der dynamischen Umgebung.

4. Evaluation

4.1 Experimentdesign

Ziel der Evaluation ist es, die Skalierbarkeit und die Auswirkungen bestimmter Organisationsstrukturen auf den vorgestellten Ansatz zu überprüfen. Zum Zwecke der Evaluation wurde ein Multiagentensystem auf Basis folgender Komponenten entwickelt. Für die Implementierung des BDI-Agentensystem wurde Jadex verwendet [23]. Die räumlichen Analysefunktionen wurden mit Hilfe der JTS Topological Suite [12] und PostGIS [24], einer GIS-Erweiterung für das Datenbanksystem PostgreSQL [25] implementiert. Die Umgebung der Agenten und die zugehörige Visualisierung wurde mit einer Weiterentwicklung der Hopix-Plattform [32] entwickelt. Abbildung 3 zeigt einen Screenshot. Die Umgebung des Agentensystems wird ebenfalls im Datenbanksystem repräsentiert.

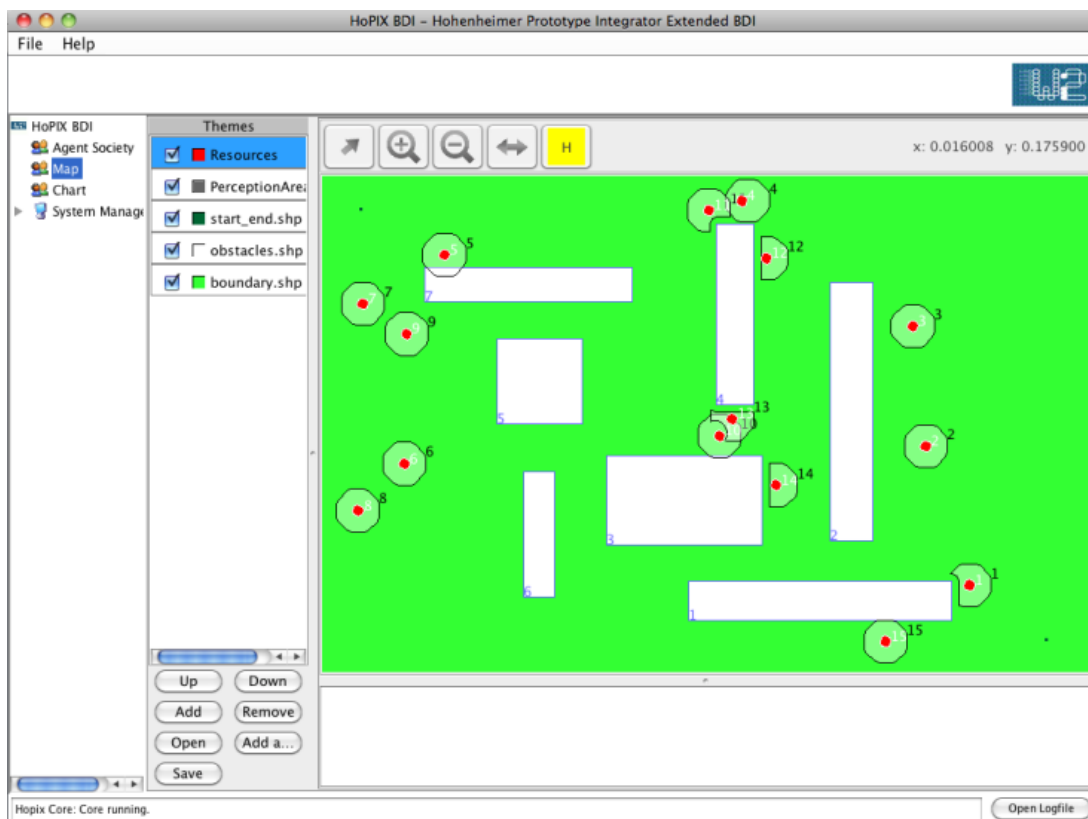


Abbildung 3. Screenshot der Simulation

Die Experimente werden auf Basis einer simulierten Baustelle als Teil der Wertschöpfungskette, d. h. der Transportdienstleistung eines Dumpers, in Abbildung 4 durchgeführt.

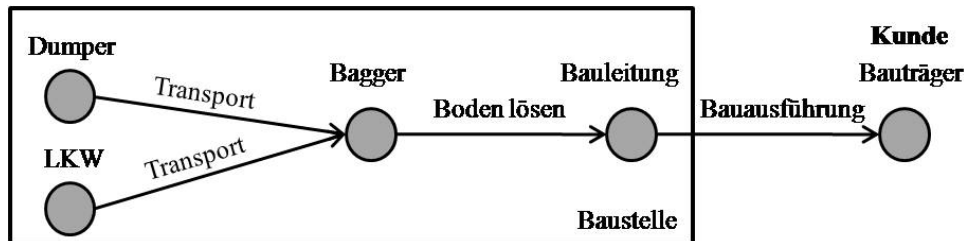


Abbildung 4. Modell einer Wertschöpfungskette zum Abtransport von Abraum an einer Baustelle (Knoten repräsentieren Akteure und die Kanten Leistungsflüsse)

Die logistische Aufgabe der autonomen Ressourcen (Dumper) ist Abraum iterativ und von einer Position der Baustelle zu einer anderen Position der Baustelle zu transportieren. In den Experimenten wurden beide Positionen für alle Ressourcen gleich gewählt. Die Ressourcen werden in der Simulation durch Agenten, welche die autonome, kollisionsfreie Bewegung simulieren, repräsentiert. Das allgemeine Setup für alle Experimente basiert auf der gleichen Umgebung und den gleichen Parametern. Formal betrachtet wird ein Modell $M: y=F(x)$, das einen Inputvektor x mit dem k Faktoren (x_1, \dots, x_k) aus dem Faktorraum X_k (Tabelle 3) durch einen Algorithmus F in einen Output y überführt. y gibt in diesem Fall die zurückgelegte Distanz zwischen der Startposition p_1 und Zielposition p_2 an. Die Fragestellung ist die nach dem Einfluss der Parameter auf y , so dass y bzgl. der Zielfunktion $Min(Distanz(p_1, p_2))$ minimal ist. In diesem Beitrag werden zwei Faktoren in zwei Experimentgruppen variiert: die Anzahl der Agenten und die Organisationsstruktur.

Tabelle 3. Faktorraum X_k

Faktoren (x_1, \dots, x_k)	Initiale Ausprägung(en)	Experimente
Anzahl der Agenten	5/10/20	ja
Organisationsstruktur	Autonomie/Team/Hierarchie	ja
Geschwindigkeit	4 Meter pro Simulationsintervall	nein
Ressourcendurchmesser	4 Meter	nein
Wahrnehmungsbereich	24 Meter	nein
Umwelt	Breite: 600 Meter, Länge 400 Meter	nein
Hindernisse	Anzahl: 7	nein
Start-/Zielpositionen	2 Positionen (kürzeste Entfernung 688 Meter)	nein
Bewegungswinkel	$\alpha_{start} = angle(p_{start}, p_{ziel})$	nein

Die Simulationsumgebung ist durch ein Rechteck mit einer Breite von 600 Metern und einer Länge von 400 m, basierend auf realen geografischen Daten, limitiert. Diese Fläche definiert auch die thematische Schicht, welche die Bewegungsflächen der Agenten bestimmt. Eine weitere Polygonschicht definiert Rechtecke, die Hindernisse darstellen.

Kollisionen mit Hindernissen und anderen Agenten sind zu vermeiden. Der Parameter *speed* beträgt 4 Meter pro Simulationsintervall, der Radius einer Ressource 4 Meter und der Durchmesser des Wahrnehmungsbereich der Agenten 24 Meter. Alle Agenten besitzen eine Startposition, eine aktuelle Position und eine Zielposition. Der initiale Winkel für die Bewegung eines Agenten wird durch den Winkel zwischen dessen Start- und Zielposition definiert.

4.2 Skalierbarkeit

Die Simulation wurde mit 5, 10 und 20 Agenten in je einem Experiment zur Analyse der Skalierbarkeit durchgeführt. Es wird die zurückgelegte Strecke zwischen den beiden vordefinierten Zielpositionen gemessen. Der optimale, direkte Weg unter Beachtung der Hindernisse hat eine Länge von 688 Metern. Als Organisationsform wurde die Autonomie gewählt; die Agenten bewältigen die Aufgabe ohne Kooperation durch Interaktion. Jedes Experiment wird über 50 Routen (50 Wechsel der Zielposition) durchgeführt. Die initiale Startposition eines Agenten wird unter Beachtung der Hindernisse und der Position anderer Agenten zufällig festgelegt; die Zielposition wird als eine der beiden im Faktorraum definierten Zielpositionen festgelegt. Der Wechsel zu einer neuen Zielposition (nach Erreichen der Zielposition) bezieht sich in diesem Experiment ebenfalls ausschließlich auf die beiden im Faktorraum definierten Positionen. Abbildung 5 zeigt den Median und die Verteilung der zurückgelegten Strecken für alle Agenten in den einzelnen Experimenten.

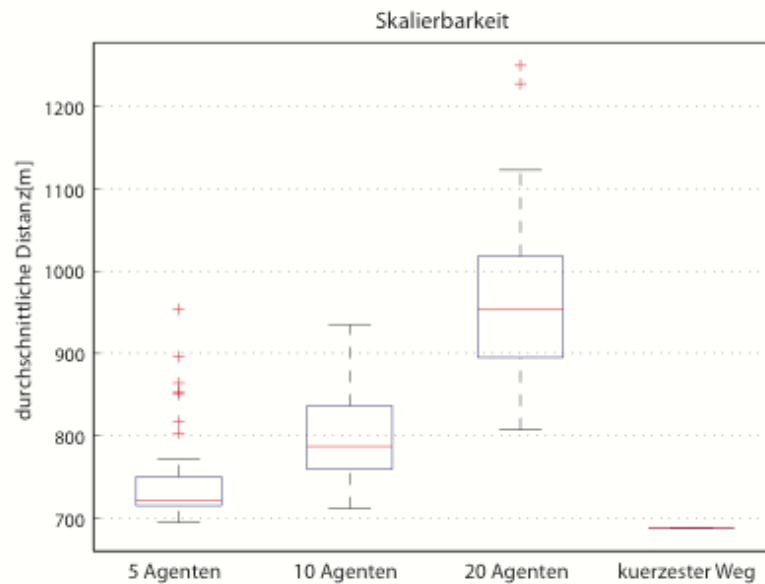


Abbildung 5. Box-Whisker-Plot zur Auswertung der zurückgelegten Distanzen der Agenten in den Experimenten zur Überprüfung der Skalierbarkeit

Die Messungen bestätigen das erwartete Ergebnis. Bei steigender Anzahl an Agenten in der Simulation werden auch die durchschnittlich, zurückgelegten Distanzen größer. Tabelle 4 vermittelt einen Eindruck über die Abweichung zwischen dem direkten Weg und dem Mittelwert der zurückgelegten Distanzen in den Experimenten.

Tabelle 4. Numerische Auswertung der Experimente

	5 Agenten	10 Agenten	20 Agenten
Durchschnittlich zurückgelegte Distanz [m]	743,7	803,1	965,0
Direkter Weg [m]	688,0	688,0	688,0
Abweichung [%]	8,1	16,7	40,3

4.3 Organisationsstruktur

Die für das Experiment ausgewählten und zu vergleichenden Organisationsstrukturen des MAS sind Autonomie, Team und Hierarchie. Da sich Agenten in einer gemeinsamen Umgebung befinden, stehen sie bei der Durchführung ihrer Aktivitäten in einer Beziehung zueinander [15]. Daraus können sich Konfliktpotentiale ergeben wie z. B. Kollisionen in der räumlichen Dimension. Picot und Baumann [22] propagieren als eine Perspektive der Organisationstheorie in der Wirtschaftsinformatikforschung die Abhängigkeiten zwischen dem Design von Organisationen einerseits und technischen Systemen andererseits und deren Auswirkungen auf Informationsverarbeitung und Entscheidungsprozesse. Die Organisation eines MAS ist die Sammlung von Rollen, Beziehungen und Autoritätsstrukturen, die das Verhalten der einzelnen Agenten steuern [10]. Um auf Basis organisationstheoretischer Ansätze Organisationsstrukturen analysieren zu können, erscheinen nach Kieser und Walgenbach [13] insgesamt fünf Strukturdimensionen (Spezialisierung, Koordination, Entscheidungsdelegation, Konfiguration und Formalisierung) als erforderlich und ausreichend.

Tabelle 5. Organisationstheoretische Analyse der im Experiment verwendeten Organisationsstrukturen

Dimension	Autonomie	Team	Hierarchie
Spezialisierung	Keine	Keine	Keine
Koordination	Feedbackkoordination durch Standardisierung von Rollen	Feedbackkoordination durch Selbstabstimmung	Feedbackkoordination durch persönliche Weisung
Entscheidungsdelegation	Keine gegenseitige Einflussnahme	Benevolente Abstimmung	Hierarchische Einflussnahme (Eigennutzenmaximierung)
Konfiguration	Einliniensystem (Gliederungstiefe=1)	Einliniensystem (Gliederungstiefe=1)	Mehrliniensystem (Gliederungstiefe=2)
Formalisierung	Bewegungsstrategie bei potentieller Kollision mit Agenten und sonstigen Hindernissen auf Basis eines definierten Ablaufes	Bewegungsstrategie bei potentieller Kollision mit Agenten auf Basis von Abstimmung, bei potentiellen Kollisionen mit sonstigen Hindernissen auf Basis eines definierten Ablaufes	Bewegungsstrategie bei potentieller Kollision mit Agenten auf Basis von Einflussnahme bei Agenten unterschiedlicher Hierarchiestufe, bei potentiellen Kollisionen mit Agenten gleicher Stufe und sonstigen Hindernissen auf Basis eines definierten Ablaufes

Die kooperativen Konzepte Autonomie und Team überführen die Eigenschaft der Vollautonomie der Agenten in eine Teilautonomie. Tabelle 5 zeigt eine organisationstheoretische Analyse der im Experiment verwendeten Organisationsstrukturen. Die Dimension der Spezialisierung wird für alle drei Strukturen nicht näher betrachtet, da alle identifizierten Ressourcen im Szenario die gleiche Transportaufgabe bearbeiten. Die Koordination erfolgt als Feedbackkoordination, d. h. die Agenten reagieren auf potentielle Kollisionen. In der Autonomiestruktur greifen ohne den Einsatz organisatorischer Koordinationsinstrumente auf Basis standardisierter Rollen die Aktivitäten der Agenten reibungslos ineinander. Das Team verwendet als Koordinationsinstrument die Selbstabstimmung; Koordinationsentscheidungen werden als Gruppenentscheidung gefällt. Die Hierarchie verwendet persönliche Weisungen; Agenten höherer Priorität können über die Bewegungsstrategie von Agenten mit niedriger Priorität bestimmen. Im Bezug auf die Entscheidungsdelegation schließt die Autonomiestruktur die gegenseitige Einflussnahme aus. Das Team basiert auf einer benevolenten Abstimmung, so dass die Gesamtheit ein wohlfahrtsmaximierendes Ergebnis erzielt, die Entscheidung für den Einzelnen allerdings von Nachteil sein kann. Die hierarchische Einflussnahme in der Hierarchiestruktur erlaubt es Agenten mit höherer Priorität ihren Eigennutzen auf Kosten von Agenten mit niedriger Priorität zu maximieren. Die Konfiguration der Autonomie- und Teamstruktur basieren auf dem Stellengefüge eines Einliniensystems mit Gliederungstiefe eins. Alle Instanzen von Agenten befinden sich auf derselben Ebene. Im Gegensatz dazu sind in der Hierarchiestruktur zwei Gliederungstiefen zulässig. Das Mehrliniensystem ermöglicht es mehreren Agenten höherer Priorität auf einen Agenten niedriger Priorität Einfluss auszuüben.

Als Formalisierung bezeichnet man in der Organisationsliteratur den Einsatz fixierter organisatorischer Regeln [13]. Für diese Experimente betrifft das die Bewegungsstrategien der einzelnen Agenten. Die Unterschiede der Bewegungsstrategien der drei Organisationsstrukturen liegen im Verhalten bei potentiellen Kollisionen zwischen Agenten. Formal lässt sich die Bewegungsstrategie für alle drei Organisationsstrukturen folgendermaßen beschreiben. Eine Funktion $p_{new}=f(p_{current}, \alpha)$ berechnet die nächste Position p_{new} eines Agenten aus der aktuellen Position $p_{current}$ und dem Bewegungswinkel α . Für α gilt $\alpha=angle(p_{current}, p_{target})\pm Min(\alpha_{mod})$. $angle$ bezeichnet eine Funktion die den Winkel zwischen zwei Positionen, der aktuellen Position des Agenten $p_{current}$ und der Zielposition p_{target} , liefert. Der Modifikationswinkel α_{mod} ist so zu wählen, dass er unter den Bedingungen (1) $p_{new}\notin ObstacleArea$ (d. h. der Agent darf sich nicht in ein Hindernis bewegen), (2) $p_{new}\neq p_a$, (d. h. der Agent darf sich nicht auf einer Position p_a befinden, auf der sich ein anderer Agent befindet), und (3) $p_{new}\subset MovementArea$, (d. h. ein Agent muss sich auf der für die Bewegung ausgewiesenen Region befinden), minimal ist, so dass sich der Agent auf dem besten Pfad Richtung Zielposition befindet.

In der Teamstruktur wird bei zwei sich in einer potentiellen Kollision befindlichen Agenten a_1 und a_2 mit Hilfe von Agentenkommunikation folgende Bewegungsstrategie verfolgt. $distance$ ist dabei eine Funktion die den Abstand zwischen zwei Positionen berechnet. Falls $(p_{target_a1}=p_{target_a2}) \wedge (distance(p_{current_a1}, p_{target_a1}) >= distance(p_{current_a2}, p_{target_a2}))$, dann

wird die Geschwindigkeit v_{a1} für das nächste Simulationsintervall auf null gesetzt. Bzw. falls $(p_{target_a1}=p_{target_a2}) \wedge (distance(p_{current_a1}, p_{target_a1}) < distance(p_{current_a2}, p_{target_a2}))$, dann wird die Geschwindigkeit v_{a2} für das nächste Simulationsintervall auf null gesetzt. Dieses Verhalten gibt dem „vorderen“ der beiden Agenten die Möglichkeit sich einen kleinen Vorsprung zu erarbeiten, so dass nicht immerfort potentielle Kollisionen zwischen diesen beiden Agenten auftreten. Falls $p_{target_a1} \neq p_{target_a2}$ wird der Bewegungswinkel modifiziert: $\alpha_{new_a1} = \alpha_{current_a1} + \pi/6$ und $\alpha_{new_a2} = \alpha_{current_a2} + \pi/6$. Dieses Verhalten hat den Effekt, dass bei tendenziell sich aufeinander zu bewegendem Agenten beide Agenten durch die Modifikation sich koordiniert mit einer Drehung von jeweils 30° aneinander vorbeibewegen.

In der Hierarchiestruktur wird ebenfalls wie bei der Teamstruktur die Bewegungsstrategie zwischen zwei sich in einer potentiellen Kollision befindlichen Agenten a_1 und a_2 verfolgt. Für die Priorität, d. h. die Hierarchiestufe gilt $prio_{a1} > prio_{a2}$. Falls $\alpha_{a2} > angle(p_{current_a1}, p_{target_a1})$ ist, gilt für den Bewegungswinkel $\alpha_{new_a2} = \alpha_{current_a2} - \pi/2$; falls $\alpha_{a2} \leq angle(p_{current_a1}, p_{target_a1})$ gilt $\alpha_{new_a2} = \alpha_{current_a2} + \pi/2$. Dieses Verhalten hat den Effekt, dass sich ein Agenten niedrigerer Priorität orthogonal vom geplanten Bewegungspfad des Agenten mit höherer Priorität wegbewegt, um dessen Bewegung nicht zu stören.

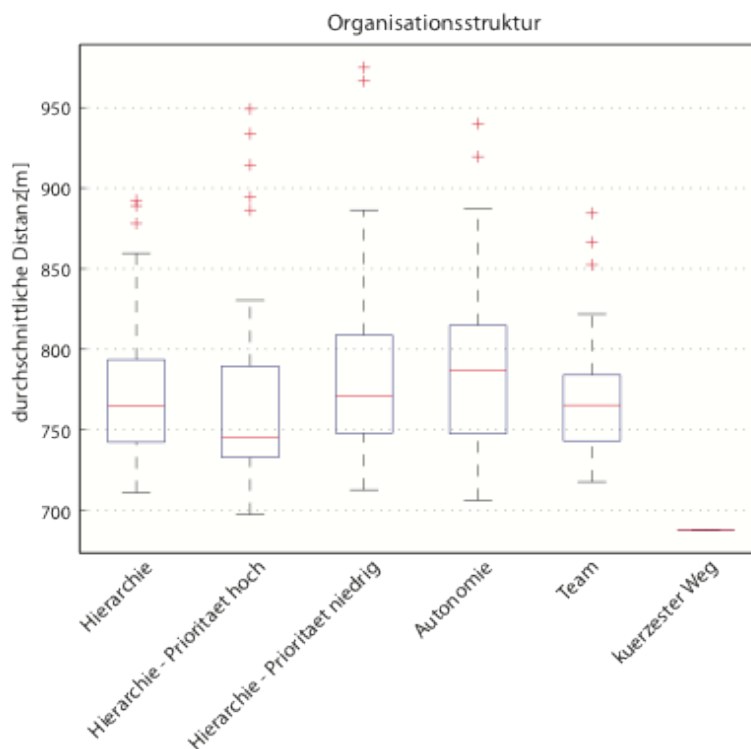


Abbildung 6. Box-Whisker-Plot zur Auswertung der durchschnittlich zurückgelegten Distanzen der Agenten in den Experimenten zur Untersuchung von Organisationsstrukturen

Die technischen Voraussetzungen für die Koordination, Entscheidungsdelegation und Konfiguration wurden im Kapitel 3 in das Agentenmodell im Rahmen der Interaktionsmöglichkeiten bzw. Kommunikationsfähigkeiten der Agenten bereits integriert. Der Aufbau (Formation) der Organisation im MAS wird in diesem Beitrag nicht betrachtet.

Die Simulation der Organisationsstrukturen wurde mit 10 Agenten in drei Experimenten durchgeführt. Es wird die zurückgelegte Strecke zwischen den beiden vordefinierten Zielpositionen gemessen. Jedes Experiment wird analog zu den vorherigen Experimenten über 50 Routen durchgeführt. Abbildung 6 zeigt den Median und die Verteilung der zurückgelegten Strecken für alle Agenten in den einzelnen Experimenten. Die verschiedenen Prioritätsstufen im Hierarchieexperiment sind zusätzlich getrennt von der kumulierten Kurve ausgewertet. Die Ergebnisse der Messung zeigen, dass sich im Mittel die Autonomiestruktur als die bzgl. der Zielfunktion schlechteste Organisationsstruktur herausstellt. Die beste Organisationsstruktur ist die Teamstruktur, wobei die Agenten mit höherer Priorität im Hierarchieexperiment ein wenig besser abschneiden. Die Gesamtheit der Hierarchiestruktur schneidet aufgrund der mit niedrigerer Priorität bzgl. der Zielfunktion schlechter gestellten Agenten schlechter als die Teamstruktur ab.

Tabelle 6 vermittelt einen Eindruck über die Abweichung zwischen dem direkten Weg und dem Mittelwert der zurückgelegten Distanzen in einem Experiment.

Tabelle 6. Numerische Auswertung der Experimente

	Hierarchie			Autonomie	Team
	gesamt	hoch	niedrig		
Durchschnittlich zurückgelegte Distanz [m]	775,6	766,4	787,3	790,0	768,0
Direkter Weg [m]	688	688	688	688	688
Abweichung [%]	12,7	11,4	14,4	14,8	11,6

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein BDI-Agentenmodell entwickelt, das qualitatives räumliches Schließen auf Basis von topologischen Informationen für eine autonome, kollisionsfreie Bewegung in dynamischen Umgebungen ermöglicht. Insbesondere profitiert die Kollisionserkennung von der Integration. Das Multiagentenparadigma bietet durch den dezentralen Ansatz geeignete Konzepte für logistische Steuerungssysteme. Die BDI-Architektur ermöglicht es, den Entscheidungsprozess basierend auf der Wissensbasis, Zielen und Absichten explizit zu modellieren. Der Lösungsansatz zeigt wie Funktionen des OpenGIS-Standards und reale geografische Daten in eine Agentenumgebung integriert und wie diese Funktionen auf die Basisrelationen und das Schließen des RCC-8 übertragen werden können. Die Analyse der Ergebnisse der Experimente zeigen, dass der Ansatz anwendbar ist. Die ökonomischen Implikationen sind insbesondere durch die Evaluation der Organisationsstrukturen präsentiert worden. Durch die unterschiedlichen Bewegungsstrategien im Bezug auf die Kollisionsvermeidung in der Dimension Raum wurde gezeigt, dass sich kooperative Strukturen effizienter als eine vollautonome Struktur verhalten.

Als weiterführende Arbeit steht eine organisationstheoretische Analyse weiterer Organisationsstrukturen an, sowie die Untersuchen zugehöriger agententheoretischer Konzepte wie die dynamische Formation von Agenten und deren Implikationen auf die Dimension Raum. Aus der Sicht der Logistik muss untersucht werden wie Agenten-Technologien, insbesondere das BDI-Paradigma, den dezentralen Ansatz logistischer Steuerungssysteme entlang des gesamten, mehrstufigen Logistiksystems speziell in der räumlichen Dimension unterstützen kann. Dies gilt ebenfalls für das räumliche Schließen. Des Weiteren muss das Agentenmodell gegen bestehende qualitative Ansätze evaluiert werden.

6. Danksagung

Diese Arbeit wurde vom BMWi im Rahmen des Förderprogramms AUTONOMIK (Projekt AutoBauLog, Förderkennzeichen 01MA09011) und vom BMBF im Rahmen des Förderprogramms KMU-innovativ (Projekt Geolog, Förderkennzeichen 01IS09019B) gefördert.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Bordini, R. H., Hübner, J. F., und Wooldridge, M. 2007. *Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak Using Jason*. John Wiley & Sons.
- [2] Bratman, M. 1987. *Intentions, Plans, and Practical Reason*. Harvard University Press.
- [3] Burrough, P. A., und McDonnell, R. A.. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. New York.
- [4] Chun, L., Zheng, Z., und Chang, W. 1999. A Decentralized Approach to the Conflict-Free Motion Planning for Multiple Mobile Robots. In *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 1544-1549.
- [5] Clark, C., Rock, S. M. und Latombe, J. C. 2003. Motion Planning for Multiple Mobile Robot Systems using Dynamic Networks. In *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*. 4222-4227.
- [6] Davidsson, P., Henesey, L., Ramstedt, L., und Törnquist, J. 2005. Agent-Based Approaches to Transport Logistics. *Transportation Research Part C*. 13, 255-271.
- [7] Fanti, M.P. 2002. Event-based controller to avoid deadlock and collisions in zone-control AGVS. *International Journal of Production Research*. 40, 6, 1453-1478.
- [8] Goodchild, M. F. 1990. Spatial Analysis Using GIS. In *Fourth International Symposium on Spatial Data Handling*. Zürich, Switzerland.
- [9] Hesse, M., und Rodrigue, J. P. 2004. The transport geography of logistics and freight distribution. *Journal of Transport Geography*. 12, 3, 171-184.
- [10] Horling, B, und Lesser, V. 2004. A survey of multi-agent organizational paradigms. *The Knowledge Engineering Review*. 19, 4, 281-316.
- [11] Jäger, M., und Nebel, B. 2001. Decentralized Collision Avoidance, Deadlock Detection, and Deadlock Resolution for Multiple Mobile Robots. In *Proceedings of*

- the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 1213-1219.
- [12] JTS Topology Suite. <http://www.vividsolutions.com/jts>.
- [13] Kieser, A., und Walgenbach, P. 2007. *Organisation*. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart.
- [14] Kim, C. W., und Tanchoco, J. M. A. 1991. Conflict-free shortest-time bidirectional AGV routing. *International Journal of Production Research*. 29, 12, 2277-2391.
- [15] Kim, S. 2002. Kooperierende intelligente Softwareagenten. *WIRTSCHAFTSINFORMATIK*. 44, 1, 53-63.
- [16] Langer, H., Gehrke, J. D., Hammer, J., Lorenz, M., Timm, I. J., und Herzog, O. 2006. A framework for distributed knowledge management in autonomous logistic processes. *International Journal of Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems*. 10, 4, 277-290.
- [17] LaValle, S. M. 2006. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press.
- [18] Lumelsky, V. J., und Harinarayan, K. R. 1997. Decentralized Motion Planning for Multiple Mobile Robots: The Cocktail Party Model. *Autonomous Robots*. 4, 1, 121-135.
- [19] Möhring, R. H., Köhler, E., Gawrilow, E., und Stenzel, B. 2004. Conflict-free Real-time AGV Routing. In *OR*. H. A., Fleuren, D., den Hertog, und P. M., Kort, Hrsg. 18-24.
- [20] Open GIS Consortium. 1999. *OpenGIS Simple Features Specification For SQL*.
- [21] Pechoucek, M. und Marik, V. 2008. Industrial deployment of multi-agent technologies: review and selected case studies. In *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 17, 3, 397-431.
- [22] Picot, A., und Baumann, O. 2009. The Relevance of Organization Theory to the Field of Business and Information Systems Engineering. *Business & Information System Engineering*. 1, 1, 62-69.
- [23] Pokahr, A., Braubach, L., und Lamersdorf, W. 2005. Jadex: A BDI Reasoning Engine. In *Multi-Agent Programming*. R. Bordini, M. Dastani, J. Dix, und A. El Fallah Seghrouchni, Hrsg. Springer, 149-174.
- [24] PostGIS. <http://postgis.refrains.net>.
- [25] PostgreSQL. <http://postgresql.org>.
- [26] Randell, D. A., Cui, Z. und Cohn, A. G. 1992. A spatial logic based on regions and connection. In *Proc. 3rd International Conference on Knowledge Representation and Reasoning*. Los Altos. 165-176.
- [27] Rao, A. S. 1996. AgentSpeak(L): BDI Agents Speak Out in a Logical computable Language. In *Proceedings of Seventh European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World*. Eindhoven, 42-55.
- [28] Renz, J., und Nebel, B. 1998. Spatial Reasoning with Topological Information. In *Spatial Cognition I - An interdisciplinary approach to representing and processing*

- spatial knowledge*. C. Freksa, C. Habel, und K. F. Wender, Hrsg. Springer, Berlin, 177-201.
- [29] Schuldt, A., und Gottfried, B. 2008. Spatiotemporal Cooperation at the Geographic Scale. In *Interdisciplinary College (IK 2008)*. B., Loos, und V., Micelli, Hrsg. 32.
- [30] Schüle, M., Herrler, R., und Klügl, F. 2004. Coupling GIS and Multiagent Simulation - Towards Infrastructure for Realistic Simulation. In *MATES volume 3187 of Lecture Notes in Computer Science*. G. Lindemann, J. Denzinger, I. J. Timm, und R. Unland, Hrsg. Springer. 228–242.
- [31] Schüle, M., Karaenke, P., Klein, A., und Bieser, T. 2009. Georeferenzierung in der Logistik. In *Proceedings der 9. Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik 2009*. (Wien, Österreich, 25.-27. Februar 2009). S. 759-768.
- [32] Schuele, M., und Karaenke, P. 2010. Qualitative spatial reasoning with topological information in BDI agents. In *Proceedings of the Workshop on Artificial Intelligence and Logistics (AILog) at the 19th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2010)*. Lisbon, Portugal.
- [33] Wolter, D., Dylla, F., Wölfl, S., Wallgrün, J. O., Frommberger, L., Nebel, B., und Freksa, C. 2008. SailAway: Spatial Cognition in Sea Navigation. *Künstliche Intelligenz*. 22, 1, 28-30.
- [34] Wooldridge, M. J. Intelligent agents. In *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. G. Weiß, Hrsg. MIT Press, Cambridge, MA, 27–77.

FZID Discussion Papers

Competence Centers:

IK:	Innovation and Knowledge
ICT:	Information Systems and Communication Systems
CRFM:	Corporate Finance and Risk Management
HCM:	Health Care Management
CM:	Communication Management
MM:	Marketing Management
ECO:	Economics
SE:	Sustainability and Ethics

Download FZID Discussion Papers from our homepage: <https://fzid.uni-hohenheim.de/71978.html>

Nr.	Autor	Titel	CC
01-2009	Julian P. Christ	NEW ECONOMIC GEOGRAPHY RELOADED: Localized Knowledge Spillovers and the Geography of Innovation	IK
02-2009	André P. Slowak	MARKET FIELD STRUCTURE & DYNAMICS IN INDUSTRIAL AUTOMATION	IK
03-2009	Pier Paolo Saviotti and Andreas Pyka	GENERALIZED BARRIERS TO ENTRY AND ECONOMIC DEVELOPMENT	IK
04-2009	Uwe Focht, Andreas Richter, and Jörg Schiller	INTERMEDIATION AND MATCHING IN INSURANCE MARKETS	HCM
05-2009	Julian P. Christ and André P. Slowak	WHY BLU-RAY VS. HD-DVD IS NOT VHS VS. BETAMAX: THE CO-EVOLUTION OF STANDARD-SETTING CONSORTIA	IK
06-2009	Gabriel Felbermayr, Mario Larch, and Wolfgang Lechthaler	UNEMPLOYMENT IN AN INTERDEPENDENT WORLD	ECO
07-2009	Steffen Otterbach	MISMATCHES BETWEEN ACTUAL AND PREFERRED WORK TIME: Empirical Evidence of Hours Constraints in 21 Countries	HCM
08-2009	Sven Wydra	PRODUCTION AND EMPLOYMENT IMPACTS OF NEW TECHNOLOGIES – ANALYSIS FOR BIOTECHNOLOGY	IK
09-2009	Ralf Richter and Jochen Streb	CATCHING-UP AND FALLING BEHIND KNOWLEDGE SPILLOVER FROM AMERICAN TO GERMAN MACHINE TOOL MAKERS	IK

Nr.	Autor	Titel	CC
10-2010	Rahel Aichele and Gabriel Felbermayr	KYOTO AND THE CARBON CONTENT OF TRADE	ECO
11-2010	David E. Bloom and Alfonso Sousa-Poza	ECONOMIC CONSEQUENCES OF LOW FERTILITY IN EUROPE	HCM
12-2010	Michael Ahlheim and Oliver Frör	DRINKING AND PROTECTING – A MARKET APPROACH TO THE PRESERVATION OF CORK OAK LANDSCAPES	ECO
13-2010	Michael Ahlheim, Oliver Frör, Antonia Heinke, Nguyen Minh Duc, and Pham Van Dinh	LABOUR AS A UTILITY MEASURE IN CONTINGENT VALUATION STUDIES – HOW GOOD IS IT REALLY?	ECO
14-2010	Julian P. Christ	THE GEOGRAPHY AND CO-LOCATION OF EUROPEAN TECHNOLOGY-SPECIFIC CO-INVENTORSHIP NETWORKS	IK
15-2010	Harald Degner	WINDOWS OF TECHNOLOGICAL OPPORTUNITY DO TECHNOLOGICAL BOOMS INFLUENCE THE RELATIONSHIP BETWEEN FIRM SIZE AND INNOVATIVENESS?	IK
16-2010	Tobias A. Jopp	THE WELFARE STATE EVOLVES: GERMAN KNAPPSCHAFTEN, 1854-1923	HCM
17-2010	Stefan Kirn (Ed.)	PROCESS OF CHANGE IN ORGANISATIONS THROUGH eHEALTH	ICT
18-2010	Jörg Schiller	ÖKONOMISCHE ASPEKTE DER ENTLOHNUNG UND REGULIERUNG UNABHÄNGIGER VERSICHERUNGSVERMITTLER	HCM
19-2010	Frauke Lammers and Jörg Schiller	CONTRACT DESIGN AND INSURANCE FRAUD: AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION	HCM
20-2010	Martyna Marczak and Thomas Beissinger	REAL WAGES AND THE BUSINESS CYCLE IN GERMANY	ECO
21-2010	Harald Degner and Jochen Streb	FOREIGN PATENTING IN GERMANY, 1877-1932	IK
22-2010	Heiko Stüber and Thomas Beissinger	DOES DOWNWARD NOMINAL WAGE RIGIDITY DAMPEN WAGE INCREASES?	ECO
23-2010	Mark Spoerer and Jochen Streb	GUNS AND BUTTER – BUT NO MARGARINE: THE IMPACT OF NAZI ECONOMIC POLICIES ON GERMAN FOOD CONSUMPTION, 1933-38	ECO

Nr.	Autor	Titel	CC
24-2011	Dharmika Dharmapala and Nadine Riedel	EARNINGS SHOCKS AND TAX-MOTIVATED INCOME-SHIFTING: EVIDENCE FROM EUROPEAN MULTINATIONALS	ECO
25-2011	Michael Schuele, Stefan Kirn	QUALITATIVES, RÄUMLICHES SCHLIEßEN ZUR KOLLISIONSERKENNUNG UND KOLLISIONSVERMEIDUNG AUTONOMER BDI-AGENTEN	ICT



FORSCHUNGSZENTRUM FZID

Universität Hohenheim
Forschungszentrum
Innovation und Dienstleistung
Fruwirthstr. 12

D-70593 Stuttgart

Phone +49 (0)711 / 459-22476

Fax +49 (0)711 / 459-23360

Internet www.fzid.uni-hohenheim.de