



Kooperative Verhaltensentscheidung für Gruppen kognitiver Automobile auf Grundlage des gemeinsamen Lagebilds

Cooperative Behavior of Groups of Cognitive Automobiles based on a Common Relevant Picture

Christian Frese, Thomas Batz und Jürgen Beyerer

Dieser Beitrag beschreibt die Bildung kooperativer Gruppen von Fahrzeugen im Straßenverkehr und die gemeinsame Verhaltensentscheidung dieser Gruppe, um komplexere Gefahrensituationen entschärfen oder beherrschen zu können. Insbesondere ist dabei an plötzlich auftretende Situationen gedacht, in denen ein Fahrer aufgrund der sehr kurzen noch verbleibenden Reaktionszeit nicht angemessen reagieren kann oder bei denen nur ein komplexes, von mehreren Fahrzeugen verlässlich gemeinsam durchgeführtes Fahrmanöver von Erfolg ist.

This article shows the formation of cooperative groups of cognitive automobiles and the coordinated behavior decision within this group in order to mitigate dangerous traffic situations. The presented approach is especially promising in complex, unforeseen situations which require coordinated maneuvers of multiple vehicles and which are not controllable by the drivers due to the limited response times.

Schlagwörter: Kognitive Automobile, gemeinsame Fahrmanöver, Software-Agenten, gemeinsames Lagebild, kooperative Gruppen

Keywords: Cognitive automobiles, cooperative maneuvering, multiagent systems, common relevant picture, cooperative groups

1 Einleitung

Das erhöhte Verkehrsaufkommen im Straßenverkehr führt zu einem nicht optimalen Verkehrsfluss, z. B. am Stauende oder beim Anfahren einer Fahrzeugkolonne nach zähfließendem Verkehr. Im Bereich der Verkehrssicherheit hat die steigende Ausrüstung der Fahrzeuge mit Sensoren (Abstand, Wetter) und Assistenzsystemen (wie ESP, ACC) zu einem deutlichen Fortschritt geführt. Dennoch existieren Gefahrensituationen, die durch Einzelfahrzeuge nicht adäquat beherrschbar sind, wie plötzlich auftretende Hindernisse auf der Straße (sich öffnende Fahrzeugtür, auf die Straße rennende Kinder, umfallende Bauabsperrung).

Zusätzliche Reaktionsmöglichkeiten entstehen, wenn es gelingt, mittels Kognition, Kommunikation und Kooperation die relevanten Fahrzeuge zu einer gemeinsam handelnden

Gruppe zu integrieren und verlässliche, abgestimmte Fahrmanöver durchzuführen.

Dies ist ein Ziel des Sonderforschungsbereiches SFB/TR 28 Kognitive Automobile.¹ Das Projekt behandelt die ganze Bandbreite des kognitiven Fahrzeugs von sensorischer Wahrnehmung, Situationserkennung und -bewertung über Verhaltensentscheidung bis hin zur Ansteuerung der Aktorik und damit auch das autonome Fahren.

Wir werden im Folgenden über einen Ausschnitt des Teilprojekts *Verteilte Kooperation* berichten und dazu einige Beispielszenarien (Abschnitt 2) vorstellen, die Architektur der gemeinsamen Verhaltensentscheidung erläutern (Abschnitt 3) und kooperative Gruppen als zentrale Handlungseinheit einführen (Abschnitt 4). Für die Situationserken-

¹<http://www.kognimobil.org>

nung und -bewertung sowie die gemeinsame Verhaltensentscheidung (Abschnitt 6) wird ein gemeinsames Lagebild (Abschnitt 5) erstellt. Daran anschließend wird die Simulationsumgebung dargestellt (Abschnitt 7). Stand und Ergebnisse (Abschnitt 8) sowie ein Fazit und Ausblick (Abschnitt 9) bilden den Schluss.

2 Beispielszenarien

Ein typisches Beispiel für das Potenzial, das durch Ad-hoc-Netze zwischen Fahrzeugen genutzt werden kann, ist ein *Warnszenario* (siehe Bild 1), bei dem nachfolgende Fahrzeuge vor einem Stau gewarnt werden, den sie aufgrund der Straßenführung, der Topographie, der Bebauung oder des Bewuchses nicht einsehen können und der noch nicht über den Verkehrsfunk gemeldet wurde. Dies erhöht die Reaktionsspanne, um auf das Ereignis zu reagieren und ermöglicht ein gemeinsames koordiniertes Abbremsen der sich annähernden Fahrzeuge.

Die Reaktionszeitspanne erhöht sich beträchtlich, wenn diese Information zusätzlich zur Funkübertragung innerhalb der kooperativen Gruppe von in Gegenrichtung fahrenden Fahrzeugen (die damit nicht Teil der Gruppe sind) ebenfalls über Funk propagiert wird. Damit ist die Nachricht nicht auf die Ausdehnung des Funknetzes beschränkt, sondern wird vom Gegenverkehr über erheblich größere Distanzen übermittelt. Derartige Warnsysteme und die dafür erforderliche Kommunikationsinfrastruktur wurden bereits vielfach untersucht [1–3]. Ein weiterer Schwerpunkt verwandter Forschungsprojekte ist das kooperative Fahren in Konvois, das so genannte *platooning*, zur Erhöhung der Straßenkapazität [4; 5]. Der Einsatz kooperativer Fahrmanöver in sicherheitskritischen Situationen wurde hingegen bisher nicht in dieser Form untersucht.

Die Möglichkeiten des gewählten Ansatzes zeigen die beiden Situationen *Abbruch eines Überholmanövers* (siehe Bild 2) und *Gemeinsames Ausweichen* (siehe Bild 3). Hier ist die Übermittlung von Information nicht ausreichend, es müssen mehrere beteiligte Fahrzeuge kooperativ, verlässlich und koordiniert agieren, um die Gefahrensituation zu bereinigen.

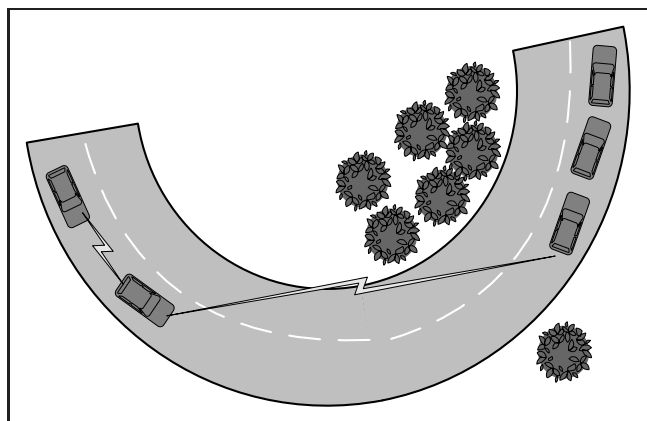


Bild 1: Beispiel: Warnszenario.

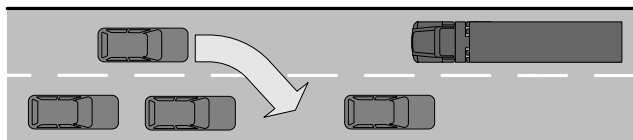


Bild 2: Situation 1: Abbruch eines Überholmanövers.

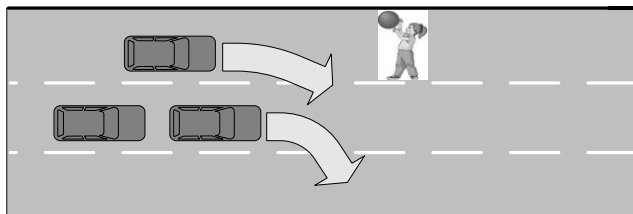


Bild 3: Situation 2: Gemeinsames Ausweichen.

In diesen Szenarien ist es nicht angemessen, die Kontrolle über die Fahrmanöver beim Fahrer zu belassen, denn dieser könnte – und wird in vielen Fällen – nicht unbedingt rational und angemessen handeln, sondern möglicherweise zu einer Panikreaktion neigen. Außerdem kann er sich nicht darauf verlassen, dass mehrere Fahrzeuge zuverlässig ein gemeinsames, synchrones und abgestimmtes Fahrmanöver durchführen.

Mittels der kooperativen Gruppe, des gemeinsamen Lagebildes und der zentral getroffenen Verhaltensentscheidung ist ein Verhalten orientiert am Systemoptimum erreichbar. Für das einzelne Fahrzeug bedeutet dies allerdings nicht zwangsläufig eine Verbesserung gegenüber dem individuell optimalen Verhalten. Zumindest geringfügige Verschlechterungen wie längere Reisezeiten und Einschränkungen des Fahrkomforts müssen in Kauf genommen werden, um ein signifikant besseres Gesamtergebnis für die kooperative Gruppe zu erreichen.

Es ist uns bewusst, dass diese Thematik erhebliche (haftungs-) rechtliche Probleme und die Notwendigkeit von möglichen Ausgleichszahlungen zwischen den beteiligten Fahrern (und ihren Versicherungen) nach sich zieht. Auch die Verhängung von Strafen für das Fehlverhalten von Fahrern steht vor ganz neuen Herausforderungen.

Die Behandlung der gerade angesprochenen Fragestellungen ist nicht Gegenstand des Projekts. Vielmehr geht es darum, die technischen Potenziale auszuloten und die daraus resultierenden Verbesserungen des Straßenverkehrs zu untersuchen.

3 Architektur

Zentrale Komponente der Software-Architektur ist die Realzeit-Datenbank [6], die alle wesentliche Information enthält und zur Datensynchronisation zwischen den Komponenten dient. Die von den Sensoren empfangenen Daten werden von der Wahrnehmung verarbeitet, von der Situationsinterpretation und Entscheidungsfindung ausgewertet und schließlich über die Steuerung an die Aktoren übergeben. Damit ist der gesamte Regelkreis des Fahrzeugs geschlossen.

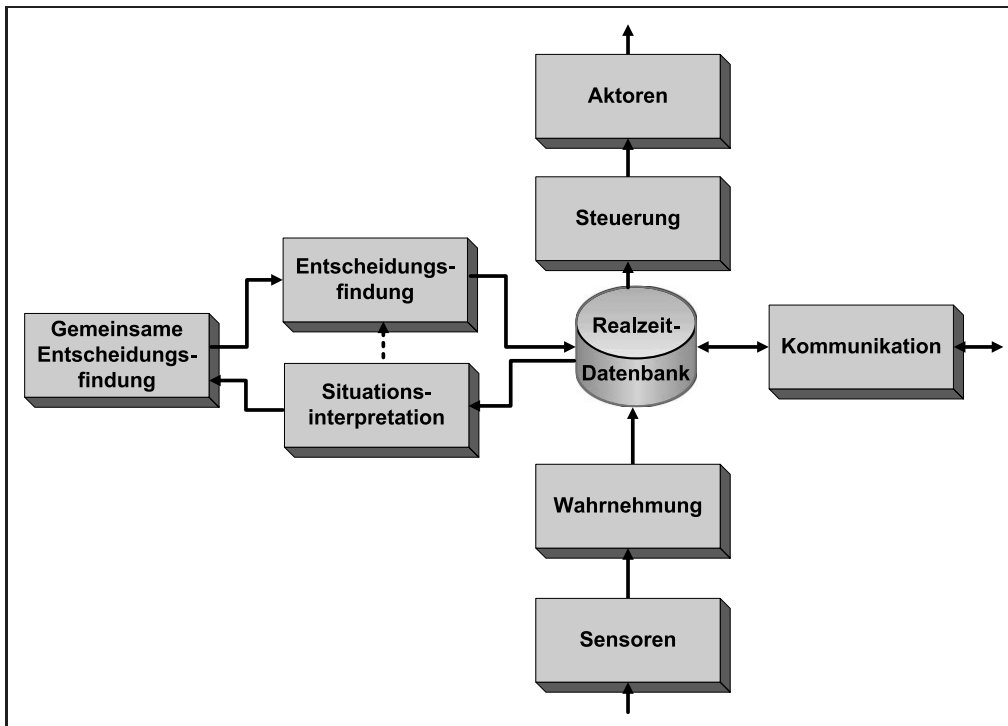


Bild 4: Architektur.

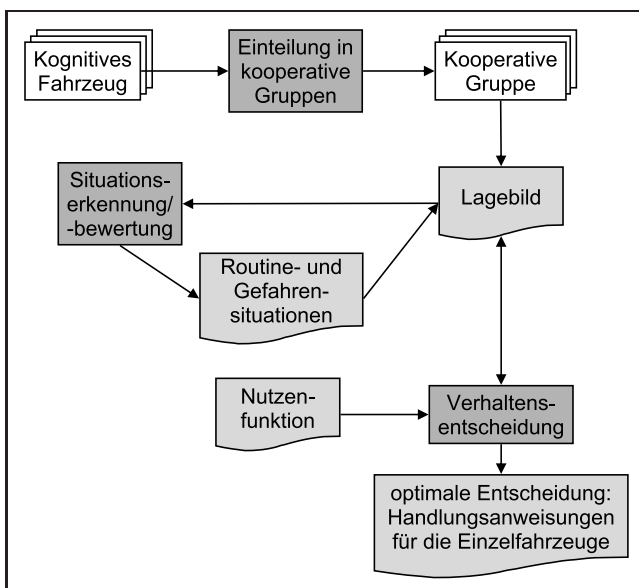


Bild 5: Generelle Abläufe.

Das System wird dadurch erweitert, dass mit anderen kooperativen Fahrzeugen kommuniziert wird und über die kooperativen Gruppen (siehe Abschnitt 4) und das gemeinsame Lagebild (siehe Abschnitt 5) eine gemeinsame Entscheidung getroffen und ein gemeinsames Verhalten durchgeführt wird.

Der generelle Ablauf für die kooperative Gruppe sieht jetzt wie folgt aus (siehe Bild 5): Zuerst bestimmen alle kognitiven Fahrzeuge, welcher Gruppe sie angehören, dann wird für jede kooperative Gruppe das gemeinsame Lagebild aufgebaut, welches die Lagebilder der Einzelfahrzeuge fusioniert. Darauf erfolgt eine Situationserkennung, die Routine- und Gefahrensituationen unterscheidet. Für Routinesitu-

ationen werden Verhaltensempfehlungen, für Gefahrensituationen Verhaltensanweisungen generiert, deren Einhaltung überwacht wird. Die gemeinsame Verhaltensentscheidung orientiert sich an der optimalen Gesamtentscheidung und nicht an der optimalen Einzelentscheidung der Fahrzeuge. Sämtliche Aktivitäten, die mehrere Fahrzeuge betreffen, werden als *verteilte Kooperation* bezeichnet.

Die grundlegende Architektur und die meisten der Komponenten sind im realen Fahrzeug und in der Simulation gleich.

4 Kooperative Gruppen

In einer kooperativen Gruppe (KG) werden Fahrzeuge mit kognitiven Fähigkeiten zusammengefasst, die sich aufgrund ihrer Route und der vorhandenen Straßentopologie innerhalb einer bestimmten Zeit treffen könnten. Hingegen ist es nicht sinnvoll, Fahrzeuge auf baulich abgetrennten Spuren oder auf darüberliegenden Brücken in einer Gruppe zusammenzufassen. Die Gruppeneinteilung wird fortlaufend bei Bedarf angepasst. Ein Fahrzeug kann nur Mitglied *einer* Gruppe sein, dies ermöglicht es, für die Gruppe ohne weitere Verhandlungsschritte eine gemeinsame Verhaltensentscheidung zu treffen.

4.1 Abstandsbegriff

Eine wichtige Voraussetzung für eine sinnvolle Gruppenbildung ist die Definition eines geeigneten Abstandsbegriffs. Zunächst muss eine problemangepasste Repräsentation der Straßentopologie gefunden werden. Hier wurde eine Modellierung als Graph \mathcal{R} gewählt, wobei jeder Kno-

ten v einem Ausschnitt der Straßenfläche entspricht, sodass sich insgesamt eine Partition des Straßennetzes ergibt. Die Funktion $v_t(c)$ ordnet einem Fahrzeug c denjenigen Knoten zu, in dessen Fläche sich der Fahrzeugmittelpunkt zum Zeitpunkt t befindet. Eine gerichtete Kante e verbindet zwei räumlich benachbarte Knoten, sofern die Fahrt in die entsprechende Richtung zulässig ist. Sie ist mit der dafür minimal benötigten Zeit gewichtet.

Die Länge $p_{\mathcal{R}}(v_1, v_2)$ des kürzesten Weges von v_1 nach v_2 in \mathcal{R} ist die mindestens benötigte Fahrzeit, um von v_1 nach v_2 zu kommen. Der Ausdruck $p_{\mathcal{R}}(v_t(c_1), v_t(c_2))$ stellt jedoch noch nicht den gesuchten Abstandsbegriff dar, denn die Fahrzeuge c_1 und c_2 könnten sich beispielsweise in der Mitte des Weges von $v_t(c_1)$ nach $v_t(c_2)$ treffen. Die Zeit bis zu diesem Aufeinandertreffen kann wesentlich kürzer sein als die Länge des kürzesten Weges im Graphen, die implizit eine statische Positionierung der Fahrzeuge annimmt. Um auch die zeitliche Variabilität berücksichtigen zu können, wird der Begriff des virtuellen Treffpunkts v_m eingeführt [7]. Der Abstand zweier Fahrzeuge berechnet sich dann als das Minimum über die möglichen Treffpunkte:

$$d_t(c_1, c_2) := \min_{v_m \in \mathcal{R}} \max\{p_{\mathcal{R}}(v_t(c_1), v_m), p_{\mathcal{R}}(v_t(c_2), v_m)\}$$

4.2 Auswahl der optimalen Partition

Auf Grundlage des beschriebenen Abstandsmaßes soll ein Verfahren entwickelt werden, das die verschiedenen Situationen im Lebenszyklus kooperativer Gruppen behandeln kann: Gründung einer Gruppe, Beitritt, Austritt, Gruppenwechsel eines Fahrzeugs, Aufspaltung einer Gruppe, Vereinigung zweier Gruppen usw. Man könnte nun Regeln definieren, die etwa den Beitritt eines Fahrzeuges vorsehen, wenn eine bestimmte Abstandsschwelle unterschritten wird. Die zahlreichen zu behandelnden Fälle und Situationen erfordern allerdings eine große Regelmenge, deren Konsistenz nicht ohne weiteres sichergestellt werden kann. Daher wird ein anderer Ansatz vorgeschlagen, der eine Entscheidung in Formalismen der kooperativen Spieltheorie

hat: Es wird eine Bewertungsfunktion $s(\mathcal{G})$ definiert, die einer beliebigen – realen oder hypothetischen – Gruppe \mathcal{G} eine reelle Zahl zuordnet. Der Partition von Fahrzeugen in Gruppen entspricht in der kooperativen Spieltheorie die Partition der Spieler in Koalitionen [8]. Die sozialen Kosten einer solchen Partition sind gegeben durch die Summe über die Bewertungsfunktionen der einzelnen Koalitionen. Die optimale Einteilung P^* ergibt sich dann als Extremum dieser Gesamtbewertung über alle Partitionen $\mathcal{P}(C)$ der Fahrzeugmenge C :

$$P^* = \arg \min_{P \in \mathcal{P}(C)} \sum_{\mathcal{G} \in P} s(\mathcal{G}) \tag{1}$$

4.3 Bewertungsfunktion

Die Bewertungsfunktion $s(\mathcal{G})$ basiert auf dem oben eingeführten Abstandsmaß d . Der Mittelwert aller paarweisen Abstände der Fahrzeuge von $\mathcal{G} = \{c_1, \dots, c_m\}$ ist der wichtigste Summand der Bewertungsfunktion:²

$$s_D(\mathcal{G}) := \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m d(c_i, c_j) \tag{2}$$

Weitere Terme modellieren die Relativbewegung der Fahrzeuge (s_V), die Gruppengröße (s_S) und eine zeitliche Hysterese (s_T):

$$s_V(\mathcal{G}) := \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \frac{\partial}{\partial t} d(c_i, c_j) \tag{3}$$

$$s_S(\mathcal{G}) := |m - m_0| \tag{4}$$

$$s_T(\mathcal{G}) := \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \begin{cases} t_i & \text{falls } 0 < t_i < t_T \\ t_T & \text{falls } t_i = 0 \text{ oder } t_i \geq t_T \end{cases} \tag{5}$$

Darin ist m_0 die gewünschte mittlere Gruppengröße, $t_T > 0$ ein Schwellwert für die zeitliche Hysterese und t_i die Zeitspanne, die Fahrzeug c_i bereits der Gruppe angehört.

² Zur Vereinfachung der Notation wird in diesem Unterabschnitt auf den Zeitindex t verzichtet.

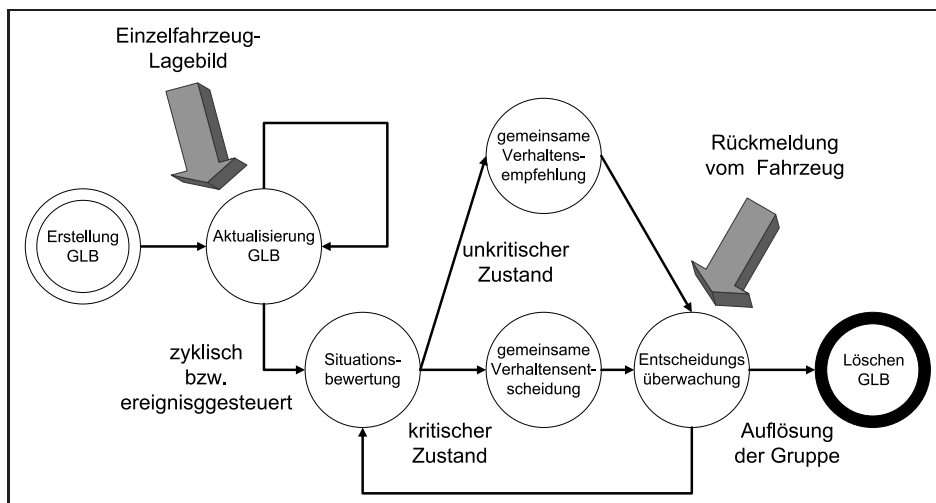


Bild 6: Zustände bei kooperativen Gruppen (KGs) und Lebenszyklus des gemeinsamen Lagebilds (GLB).

Die Bewertungsfunktion wird als gewichtete Summe dieser Terme mit Gewichtungsfaktoren $\lambda_k > 0$ definiert [7]:

$$s(\mathcal{G}) := \lambda_{DSD}(\mathcal{G}) + \lambda_{VSV}(\mathcal{G}) + \lambda_{SSS}(\mathcal{G}) + \lambda_{TST}(\mathcal{G}) \quad (6)$$

4.4 Kommunikationsprotokoll

Um die verteilte Realisierbarkeit des vorgeschlagenen Verfahrens nachzuweisen, wurde ein Kommunikationsprotokoll entworfen und im Rahmen eines Multi-Agenten-Systems implementiert [9]. Das Protokoll unterscheidet zwischen der Kommunikation innerhalb einer Gruppe und der Inter-Gruppen-Kommunikation. Letztere wird von einem ausgezeichneten Fahrzeug je Gruppe abgewickelt, das als Gruppenkoordinator bezeichnet wird. Innerhalb einer Gruppe senden die Mitglieder ihre aktuellen Positionsdaten an den Koordinator. Nach dem Austausch dieser Daten zwischen benachbarten Koordinatoren kann die lokal optimale Gruppeneinteilung nach Gleichung (1) berechnet werden. Falls sie sich von der aktuellen Partition unterscheidet, wird den betroffenen Fahrzeugen von ihrem jeweiligen Koordinator ihre neue Gruppenzuordnung mitgeteilt.

Das vorgestellte Verfahren stellt einen Formalismus dar, der die in Abschnitt 4.2 aufgezählten Abläufe im Lebenszyklus kooperativer Gruppen auf einheitliche Art und Weise behandelt.

5 Gemeinsames Lagebild

Wie bereits bei der Gruppenbildung dargestellt, handelt eine kooperative Gruppe als Einheit. Um eine geeignete Grundlage für die Beschreibung und Bewertung der Situation und die daran anschließende Verhaltensempfehlung oder -anweisung zu erhalten, wird ein gemeinsames Lagebild (GLB) etabliert.

Für das Lagebild eines Einzelfahrzeuges findet man in der Literatur [10; 11] den EVD-Ansatz (Environment: Umgebung, Vehicle: Fahrzeug, Driver: Fahrer). Damit lässt sich ein Lagebild eines Einzelfahrzeuges beschreiben und für dieses eine Situationsbewertung und Verhaltensentscheidung vornehmen.

Um wie in unserem Fall das gemeinsame Lagebild einer kooperativen Gruppe beschreiben zu können, muss dieser Ansatz erweitert werden. Er enthält m Fahrzeuge, m Fahrer, die Kommunikation (C) zwischen den Fahrzeugen und gegebenenfalls der Umgebung sowie die gerade vorhandene (komplexe Fahr-) Situation (S).

Damit ergibt sich ein $E\{VD\}^m CS$ -Ansatz, wobei m die Anzahl der kooperativen Fahrzeuge in der Gruppe darstellt. Alle diese Dimensionen haben statische und dynamische Anteile:

- **Umgebung:**
 - *statisch:* Verkehrswege (bestehend aus einzelnen Fahrspuren), generelle Befahrbarkeit Straßenränder, Verkehrszeichen,
 - *dynamisch:* Wetter, Ampeln, aktuelle Befahrbarkeit Straßenränder.

- **Fahrzeug:**
 - *statisch:* Gewicht, Motorisierung, Abmessungen,
 - *dynamisch:* konkrete Ausstattung, eingeschaltete Fahrerassistenzsysteme wie ACC, Position, Geschwindigkeit, Lenkwinkel, Beschleunigung, Zustand des Blinkers.
- **Fahrer:**
 - *statisch:* Fahrermodell (Vorlieben, Fahrertyp),
 - *dynamisch:* Route, Intention, Aufmerksamkeit, Aufnahmefähigkeit, aktuelles und geplantes Fahrmanöver.
- **Kommunikation:**
 - *statisch:* Prioritäten-Modell, maximale Bandbreite bzw. Reichweite,
 - *dynamisch:* aktuelle Bandbreite bzw. Reichweite.
- **Situation:**
 - *statisch:* Gefährdungs- bzw. Situationsklassen,
 - *dynamisch:* aktuelle und vorhersehbare Situationen, Gefahrenzustände, gemeinsames Lagebild, bewegliche und statische Hindernisse, andere Verkehrsteilnehmer (Radfahrer, Fußgänger), nicht kognitive Fahrzeuge, Lagebilder von Einzelfahrzeugen.

Bei den meisten der genannten Attribute ist eine probabilistische Repräsentation erforderlich. Beispielsweise wird zusätzlich zur Fahrzeugposition in kartesischen Weltkoordinaten auch die Kovarianzmatrix der Messung im Lagebild gespeichert. Ein weiterer Bestandteil des Lagebilds sind Relationen zwischen Objekten, etwa zwischen einem Fahrzeug und seiner momentanen Fahrspur.

Das gemeinsame Lagebild einer Gruppe sollte aufgrund seines umfangreichen Informationsgehalts eine zuverlässige Grundlage für die Situationsbewertung und die gemeinsame Verhaltensentscheidung bieten.

6 Gemeinsame Verhaltensentscheidung

6.1 Ziele und Herausforderungen

In Situationen wie den in Abschnitt 2 beschriebenen kann ein gemeinsames, abgestimmtes Verhalten der beteiligten Fahrzeuge Unfälle vermeiden. Die gemeinsame Verhaltensentscheidung sollte in der Lage sein, in solchen Fällen geeignete Ausweich- und Bremsmanöver zu ermitteln. Andererseits sollte sie in unkritischen Situationen zur Verbesserung des Verkehrsflusses beitragen. Diese unterschiedlichen Anforderungen lassen sich in einer multikriteriellen Nutzenfunktion formalisieren. Das oberste Ziel muss dabei die Vermeidung von Unfällen bzw. die Reduktion der Unfallschwere sein. Danach folgen zahlreiche weitere Kriterien wie die Einhaltung der Verkehrsregeln, die Minimierung der Reisezeit und des Energieverbrauchs, die Vermeidung starker Beschleunigungen und Verzögerungen aus Gründen des Fahrkomforts usw. Gemäß der Entscheidungstheorie erhält man die optimale Handlungsalternative durch die Maximierung der resultierenden Nutzenfunktion.

Die Verhaltensentscheidung für Fahrzeuge im Straßenverkehr ist eine anspruchsvolle Aufgabe, da verschiedenste

Umgebungsbedingungen und Zustände berücksichtigt werden müssen. Beispielsweise gibt es eine Vielzahl möglicher Fahrspurverläufe, Kreuzungstypen und Vorfahrtsregelungen. Entsprechend komplex ist auch die Interpretation des Verhaltens der anderen Verkehrsteilnehmer.

Verglichen mit der Verhaltensentscheidung für ein Einzelfahrzeug ist die Komplexität der gemeinsamen Verhaltensentscheidung für eine Gruppe kognitiver Automobile noch deutlich größer. Zwar wird die Aufgabe einerseits dadurch erleichtert, dass bestimmte Informationen wie Zustand und geplante Handlung anderer Fahrzeuge über Funk kommuniziert werden können und nicht mehr aus Beobachtungen geschätzt werden müssen. Andererseits wächst die Anzahl der möglichen Aktionen einer Gruppe exponentiell mit der Anzahl der Fahrzeuge, da jede Handlungsalternative eines Fahrzeugs mit allen Alternativen der anderen Fahrzeuge kombiniert werden kann. Diese kombinatorische Explosion des Lösungsraums macht die gemeinsame Verhaltensentscheidung zu einem komplexen Optimierungsproblem.

6.2 Konzept

Bei der gemeinsamen Verhaltensentscheidung und -ausführung sind folgende Schritte zu unterscheiden:

1. Berechnung des optimalen Verhaltens für die kooperative Gruppe auf Grundlage des gemeinsamen Lagebilds,
2. Kommunikation der Handlungsanweisungen innerhalb der Gruppe und verbindliche Zustimmung der betroffenen Einzelfahrzeuge,
3. Verhaltensausführung und -überwachung.

Die Berechnung des Optimalverhaltens kann auf einem einzelnen Fahrzeug – etwa dem Gruppenkoordinator – durchgeführt oder über mehrere Fahrzeuge verteilt werden. In diesem Schritt ist eine vergleichsweise detaillierte Berücksichtigung der Fahrzeugzustände und der Umgebung erforderlich, um die tatsächliche Ausführbarkeit und Sicherheit der resultierenden Handlungen zu gewährleisten. Im Unterschied dazu kann die im zweiten Schritt kommunizierte Verhaltensanweisung bzw. -empfehlung auf einer abstrakteren, symbolischen Ebene formuliert werden, etwa in der Form „sofort nach links ausweichen“.

Die weiteren Überlegungen beziehen sich auf den ersten Punkt. Um die Komplexität des Problems beherrschen zu können, bietet sich ein hierarchischer Ansatz zur Verhaltensentscheidung an. Auf der oberen Abstraktionsebene werden Handlungen symbolisch repräsentiert, beispielsweise in Form von Plänen. Solche Methoden können insbesondere zur Verbesserung des Verkehrsflusses dienen, etwa durch eine optimierte Auswahl der Fahrspur auf Autobahnen. Um allerdings sicherheitskritische Situationen durch gemeinsame Manöver entschärfen zu können, ist eine detailliertere Betrachtung notwendig: Fahrzeug und Umgebung müssen auf der unteren Abstraktionsebene geometrisch und kinematisch modelliert werden.

6.3 Möglichkeiten zur kooperativen Manöverplanung

Diese untere Abstraktionsebene wird im Folgenden genauer untersucht. Zunächst werden kurz die Schwierigkeiten dargestellt, die sich bei dem Versuch ergeben, aus der Literatur bekannte Verfahren auf das Problem der kooperativen Verhaltensentscheidung zu übertragen. Rein reaktive Ansätze sind im Verkehrsbereich nicht angebracht, da hier aus Sicherheitsgründen und wegen der Dynamik von Kraftfahrzeugen eine gewisse Vorausplanung erforderlich ist. Die Übertragung von Methoden für Einzelfahrzeuge auf das kooperative Entscheidungsproblem scheitert häufig daran, dass die Komplexität infolge des höherdimensionalen Lösungsraums nicht mehr beherrschbar ist. In der Robotik wird daher häufig die Annahme getroffen, dass Bahnen für einzelne Roboter entkoppelt geplant und in einem zweiten Schritt zeitlich koordiniert werden können [12]. Dies impliziert jedoch, dass die Roboter instantan anhalten können – eine Annahme, die bei der Manöverplanung für Automobile sicherlich nicht zulässig ist.

Als ein geeigneter Kandidat für ein Verfahren zur kooperativen Verhaltensentscheidung erweist sich die Methode der elastischen Bänder. Sie wird in der Literatur zur Bahnplanung für Einzelfahrzeuge eingesetzt [13; 14]. In den folgenden Abschnitten wird eine geeignete Erweiterung und Anpassung dieses Verfahrens auf das kooperative Problem vorgestellt.

6.4 Die Methode der elastischen Bänder

Die Bewegung jedes beteiligten Fahrzeugs wird durch ein elastisches Band beschrieben. In Analogie zur Mechanik kann es als eine Kette von Massepunkten interpretiert werden, die durch Federn verbunden sind. Die Massepunkte oder Knoten liegen alle in einer Ebene und sind durch x - und y -Position charakterisiert. Auf dieses Feder-Masse-System wirken Kräfte ein, die einerseits vom elastischen Band selbst, andererseits von äußeren Einflüssen verursacht werden. Die inneren Kräfte bewirken eine stetige räumliche Verteilung der Knoten. Äußere Kräfte ziehen das elastische Band zur Fahrbahnmitte hin und stoßen es von Hindernissen ab. Aufgrund der Modellierung der Knoten als Punkte lassen sich zunächst nur kreisförmige Objekte direkt beschreiben. Andere Geometrien, wie etwa Rechtecke, können jedoch durch eine Überdeckung mehrerer Kreise angenähert werden [14]. Das elastische Band bewegt sich nun in dem von den verschiedenen Kräften verursachten Potenzialfeld, bis ein Kräftegleichgewicht erreicht wird.

Jeder Knoten beschreibt die Position des Fahrzeugs zu einem definierten Zeitpunkt. Die Kräfte zur Abstoßung vom Straßenrand und von statischen Hindernissen wirken zu jedem Zeitpunkt. Zwischen verschiedenen kooperativen Fahrzeugen müssen die abstoßenden Kräfte aber lediglich zu korrespondierenden Zeitpunkten angreifen. Dies ist der entscheidende Schritt zur Verallgemeinerung der existierenden Ansätze auf das kooperative Problem.

Das System kann alternativ über das Potenzialfeld oder über die Kräfte beschrieben werden, die den Gradienten des Potenzialfelds entsprechen. Beide Betrachtungsweisen sind weitgehend äquivalent. Für die folgende Darstellung wird die Kräftemodellierung gewählt.

6.5 Modellierung der Kräfte

Jedem Fahrzeug c_i ist ein elastisches Band zugeordnet, welches aus M Knoten besteht (siehe Bild 8). Knoten j des elastischen Bands von Fahrzeug c_i beschreibt die Fahrzeugposition zum Zeitpunkt j . Diese wird mit $\mathbf{x}_{ij} = (x_{ij}, y_{ij})^T$ bezeichnet, die am entsprechenden Knoten einwirkende Kraft mit \mathbf{F}_{ij} . Die Knoten werden entsprechend den diskreten Zeitpunkten $j = 0, \dots, M - 1$ nummeriert, wobei $j = 0$ dem aktuellen Zeitpunkt entspricht.

Die inneren Kräfte sollen gewährleisten, dass die resultierende Bahn zusammenhängend und fahrbar ist. Um dies zu erreichen, müssen sie insbesondere zu starke Beschleunigungen oder Verzögerungen vermeiden, d. h. die Abstände benachbarter Knoten zueinander dürfen sich nur langsam ändern. Die zugehörige innere Kraft wird modelliert als

$$\mathbf{F}_{ij}^{\text{dist}} := (\|\mathbf{x}_{i,j+1} - \mathbf{x}_{i,j}\| - \|\mathbf{x}_{i,j} - \mathbf{x}_{i,j-1}\|)(\mathbf{x}_{i,j+1} - \mathbf{x}_{i,j}).$$

Infolge der nichtholonomen Eigenschaften von Automobilen und ihrer Dynamik müssen die Winkel zwischen aufeinander folgenden Abschnitten der Bahn begrenzt werden. Dies bewirkt die innere Kraft

$$\mathbf{F}_{ij}^{\text{ang}} := \alpha_{ij} \mathbf{v}_{ij}, \quad (7)$$

wobei α_{ij} den Winkel zwischen dem $j - 1$ -ten und j -ten Segment des Bands bezeichnet und \mathbf{v}_{ij} die Tangente des Kreises um $\mathbf{x}_{i,j-1}$ am Punkt $\mathbf{x}_{i,j}$ ist.

Die äußeren Kräfte müssen das Fahrzeug auf der Straße halten und Kollisionen mit anderen Fahrzeugen vermeiden. Ersteres wird erreicht durch

$$\mathbf{F}_{ij}^{\text{road}} := r(\mathbf{x}_{ij}) \mathbf{n}(\mathbf{x}_{ij}). \quad (8)$$

Dabei ist $\mathbf{n}(\mathbf{x}_{ij})$ der Normalenvektor der Straße und $r(\mathbf{x}_{ij})$ der vorzeichenbehaftete Abstand zum Straßenrand unter Berücksichtigung einer Sicherheitsreserve.

Kollisionen zwischen Fahrzeugen der kooperativen Gruppe werden vermieden durch abstoßende Kräfte zwischen Knoten mit gleichem Zeitindex j :

$$\mathbf{F}_{kj}^{\text{coop}} := \sum_{i \neq k} e^{-\|\mathbf{x}_{kj} - \mathbf{x}_{ij}\|} (\mathbf{x}_{kj} - \mathbf{x}_{ij}). \quad (9)$$

Die resultierende Kraft an einem einzelnen Knoten ergibt sich aus der Summe der Einzelkräfte:

$$\mathbf{F}_{ij} := \mathbf{F}_{ij}^{\text{dist}} + \mathbf{F}_{ij}^{\text{ang}} + \mathbf{F}_{ij}^{\text{road}} + \mathbf{F}_{ij}^{\text{coop}} \quad (10)$$

Durch ein iteratives numerisches Verfahren kann der Zustand des Kräftegleichgewichts berechnet werden:

$$\mathbf{F}_{ij} = 0 \quad \forall i, j \quad (11)$$

Die Knoten zum Zeitschritt $j = 0$ sind an der aktuellen Position des Fahrzeugs fixiert. Die initialen Positionen $\mathbf{x}_{ij}^{\text{init}}$ der weiteren Knoten mit $j > 0$ werden über eine Prädiktion mit Hilfe eines Einspurmodells gewonnen, wobei Beschleunigung und Lenkwinkel als konstant angenommen werden.

6.6 Diskussion

Das beschriebene Verfahren stellt einen vielversprechenden Ansatz zur kooperativen Verhaltensentscheidung auf der unteren Abstraktionsebene dar. Es erzeugt mit vertretbarem Rechenaufwand grobe Trajektorienvorgaben für koordinierte Fahrmanöver. Diese berücksichtigen verschiedene Beschränkungen auf heuristische Weise. Zur genauen Trajektorienplanung und Fahrbarkeitsüberprüfung ist eine nachgelagerte Interpolation zwischen den Knoten erforderlich [14].

Infolge der heuristischen Vorgehensweise kann nicht a priori garantiert werden, dass die berechnete Lösung zulässig ist. Die Güte des Ergebnisses lässt sich allerdings bereits anhand der Beträge der im Gleichgewichtszustand wirksamen Einzelkräfte abschätzen. Ist sie nicht mehr im zulässigen Bereich, so kann ein Assistenzsystem auf anderem Wege zu einer Entscheidung gelangen und beispielsweise eine Notbremsung aller betroffenen Fahrzeuge veranlassen oder lediglich eine Warnung an die Fahrer ausgeben.

Die vorgestellte Modellierung erlaubt es, weitere Einflüsse als zusätzliche Einzelkräfte zu integrieren.

7 Simulation

Innerhalb des Projektes wurde eine Simulationsumgebung realisiert, die es erlaubt, einen Teil der simulierten Fahrzeuge mit externen Programmen zu steuern, um Algorithmen zur gemeinsamen Verhaltensbewertung, -entscheidung und -durchführung zu testen. Somit können Versuche mit einer größeren Anzahl kognitiver Automobile durchgeführt werden, als derzeit an experimentellen Testfahrzeugen zur Verfügung steht. Außerdem können Gefahrensituationen simuliert werden, die im realen Verkehr normalerweise nicht getestet werden können. Die Simulationsumgebung erlaubt es auch, einzelne Szenen mit identischer Ausgangsposition mehrfach in gleicher Weise ablaufen zu lassen, um Algorithmen und Parametrierungen zu testen.

Die Simulation (siehe Bild 7 und [15]) besteht aus einem Szeneneditor, einer Ablaufumgebung für die eigentliche Verkehrssimulation, einer Realzeitdatenbank (RTDB) für die gesamte Szene, Realzeitdatenbanken für die Ausschnitte, die ein Einzelfahrzeug in einer Szene sieht, sowie aus Verarbeitungskomponenten für die Wahrnehmung, Szeneninterpretation, Verhaltensentscheidung, verteilte Kooperation und Bahnplanung.

Die Verkehrssimulation erhält aus der RTDB die neuen Positionen der kognitiven Fahrzeuge für den nächsten Zeittakt und berechnet für die nicht kognitiven Fahrzeuge die

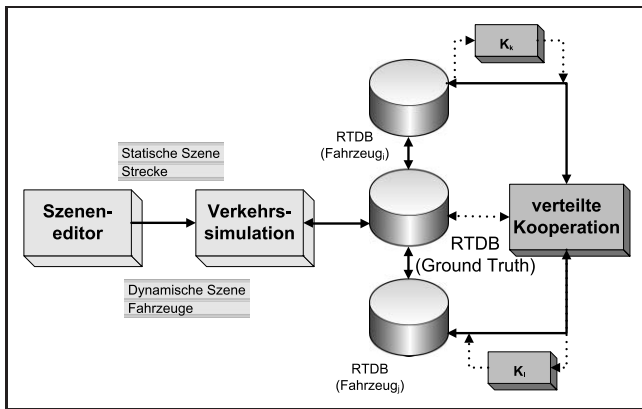


Bild 7: Simulationsumgebung.

neue Position. Im nächsten Simulationsschritt wiederholt sich der gleiche Ablauf.

Die gewählte Architektur ermöglicht es, zu einer statischen Szene verschiedene dynamische Szenen zu laden und damit auf einfache Weise unterschiedliche Konstellationen zu testen. Es ist auch möglich, verschiedene Algorithmen für die Verarbeitung zu verwenden und die Auswirkungen an der identischen Szene zu untersuchen. Weiterhin können auch Auswirkungen von Messungenauigkeiten bzw. Messfehlern untersucht werden, indem die Information bei der Übertragung von der Ground-Truth-RTDB in die Einzelfahrzeug-RTDB gezielt verändert wird.

7.1 Software-Agenten zur verteilten Informationsverarbeitung

Als Kernstück für die softwaretechnische Umsetzung innerhalb der Simulation bei der Gruppenbildung wie auch der Situationsbewertung und Verhaltensentscheidung dient ein Agentensystem nach dem *Belief-Desire-Intention-Paradigma*. Die Konzeption als Agentensystem bietet sich an, da verschiedene Aktivitäten parallel ablaufen (Empfang von Information anderer kognitiver Fahrzeuge, Fusion von Information, Lagebeurteilung, Überwachung der Einhaltung von Fahrrestriktionen) und proaktiv durchgeführt werden müssen. Die Kommunikation zwischen den Fahrzeug-Agenten ist insbesondere in der Simulation mit Bordmitteln der Agentenplattform einfach zu realisieren.

In unserer konkreten Implementierung wird das System JADEX als Erweiterung der JADE-Agentenplattform eingesetzt.

8 Stand und Ergebnisse

Das System befindet sich in der Entwicklung, die Gruppenbildung ist bereits realisiert und liefert nutzbare und nachvollziehbare Ergebnisse [7;9]. Die Implementierung des gemeinsamen Lagebildes ist zurzeit im Gange.

Der vorgestellte Ansatz zur kooperativen Verhaltensentscheidung auf Grundlage der elastischen Bänder wurde

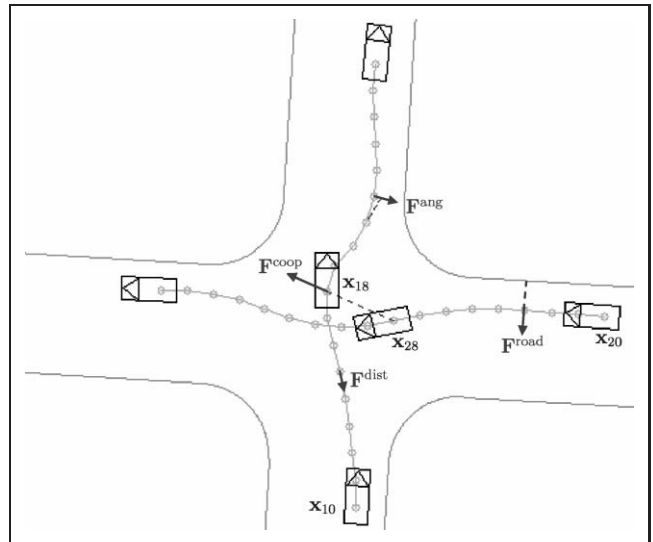


Bild 8: Kooperatives Ausweichen auf einer Kreuzung: Veranschaulichung der elastischen Bänder, einzelner Fahrzeugpositionen und Kräfte.

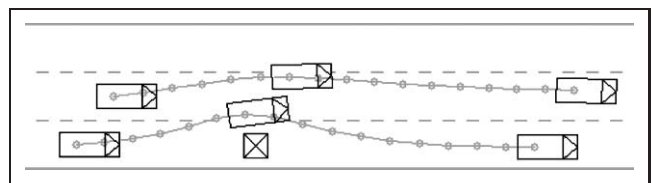


Bild 9: Kooperatives Ausweichen bei einem Hindernis auf einer mehrspurigen Straße (Beispielsituation 2).

prototypisch implementiert und in zahlreichen Simulationläufen getestet. Die Bilder 8 und 9 zeigen Beispiele für die generierten kooperativen Fahrmanöver.

9 Fazit und Ausblick

Die Kooperation von Fahrzeugen kann in sicherheitskritischen Situationen zur Unfallvermeidung und in Normal-situationen zur Verbesserung des Verkehrsflusses beitragen. In diesem Artikel wurde eine Architektur zur verteilten Kooperation vorgestellt. Einzelne Komponenten wie Gruppenbildung, gemeinsames Lagebild und kooperative Verhaltensentscheidung wurden beschrieben. Die Situationsbewertung und die Verhaltensentscheidung auf oberer Abstraktionsebene sind in Arbeit und fügen sich nahtlos in das vorgestellte Konzept ein. Zukünftige Arbeiten umfassen außerdem eine systematische Evaluation der existierenden Komponenten.

Ein Schwerpunkt der weiteren Forschung wird die Verarbeitung unsicherer Information sein. Die Berücksichtigung von Sensorunsicherheiten in einzelnen Systemkomponenten ist auf naheliegende Art und Weise möglich, indem z. B. in der Verhaltensentscheidung eine an die Standardabweichungen gekoppelte Sicherheitsreserve eingeführt wird. Die durchgängige Verarbeitung unsicherer und unvollständiger Information im gesamten System ist jedoch eine weitgehend offene Forschungsfragestellung.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des SFB/TR 28 „Kognitive Automobile“ gefördert. Die Autoren danken den Projektpartnern, die an der Entwicklung der Simulations- und Visualisierungsumgebung sowie der Softwareplattform beteiligt sind. Außerdem danken die Autoren dem anonymen Gutachter für seine wertvollen Hinweise.

Literatur

- [1] M. Straßberger und C. Adler. Lokale Gefahrenwarnung in Fahrzeug-Ad-Hoc-Netzen – Eine umfassende Analyse und aktuelle Lösungsansätze. In *2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, S. 267–276, April 2006.
- [2] M. Torrent-Moreno. Inter-vehicle communications: Assessing information dissemination under safety constraints. In *Conf. on Wireless on Demand Network Systems and Services*, S. 59–64, 2007.
- [3] R. Nagel, S. Eichler und J. Eberspächer. Intelligent wireless communication for future autonomous and cognitive automobiles. In *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 716–721, 2007.
- [4] P. Varaiya. Smart cars on smart roads: Problems of control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(2):195–207, Februar 1993.
- [5] T.-S. Dao, C. Clark und J. P. Huissoon. Distributed platoon assignment and lane selection for traffic flow optimization. In *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 739–744, 2008.
- [6] M. Goebel und G. Färber. A real-time-capable hard- and software architecture for joint image and knowledge processing in cognitive automobiles. In *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 734–740, 2007.
- [7] C. Frese, J. Beyerer und P. Zimmer. Cooperation of cars and formation of cooperative groups. In *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 227–232, Juni 2007.
- [8] T. Sandholm, K. Larson, M. Andersson, O. Shehory und F. Tohme. Worst-case-optimal anytime coalition structure generation. In *Proc. AAAI*, S. 46–53, Juli 1998.
- [9] C. Frese und J. Beyerer. Bildung kooperativer Gruppen kognitiver Automobile. In *Autonome Mobile Systeme*, S. 177–183. Springer, 2007.
- [10] J. McCall und M. Trivedi. Driver behavior and situation aware brake assistance for intelligent vehicles. *Proc. IEEE*, 95(2):374–387, Februar 2007.
- [11] M. Trivedi und S. Cheng. Holistic sensing and active displays for intelligent driver support systems. *IEEE Computer*, 40(5):60–68, Mai 2007.
- [12] P. Švestka und M. Overmars. Coordinated motion planning for multiple car-like robots using probabilistic roadmaps. In *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, 1995.
- [13] T. Brandt, T. Sattel und J. Wallaschek. On automatic collision avoidance systems. *SAE Transactions*, April 2005.
- [14] J. Hilgert, K. Hirsch, T. Bertram und M. Hiller. Emergency path planning for autonomous vehicles using elastic band theory. In *Proc. IEEE/ASME Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2003.
- [15] S. Vacek, R. Nagel, T. Batz, F. Moosmann und R. Dillmann. An integrated simulation framework for cognitive automobiles. In *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 221–226, Juni 2007.

Manuskripteingang: 9. Juni 2008.



Dipl.-Inform. Christian Frese ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH). Hauptarbeitsgebiete: Kognitive Systeme, Wissensrepräsentation, Graphenalgorithmen, Robotik.

Adresse: Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Adenauerring 4, 76128 Karlsruhe, E-Mail: frese@ies.uni-karlsruhe.de



Dipl.-Inform. Thomas Batz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB). Hauptarbeitsgebiete: Software-Agenten, Architektur von Informationssystemen, Projektmanagement, Public Key Infrastrukturen.

Adresse: Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB), Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe, E-Mail: Thomas.Batz@iitb.fraunhofer.de



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer ist Leiter des Fraunhofer-Instituts IITB und Inhaber des Lehrstuhls für Interaktive Echtzeitsysteme an der Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH). Hauptarbeitsgebiete: Automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung, Fusion heterogener Informationsquellen, Informationstheorie, Systemtheorie, Statistische Verfahren, Messtechnik.

Adresse: Fraunhofer IITB, Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe, E-Mail: Juergen.Beyerer@iitb.fraunhofer.de