



(10) **DE 10 2011 083 677 A1** 2013.04.04

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2011 083 677.2**
 (22) Anmeldetag: **29.09.2011**
 (43) Offenlegungstag: **04.04.2013**

(51) Int Cl.: **G08G 1/0967 (2011.01)**
G01C 21/26 (2011.01)

(71) Anmelder:
**Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft,
 80809, München, DE**

DE 10 2006 059 037 A1
DE 10 2008 058 495 A1
US 2009 / 0 043 486 A1
US 2010 / 0 063 715 A1

(72) Erfinder:
**Schweiger, Benno, 81827, München, DE; Kates,
 Ronald, Dr., 83624, Otterfing, DE; Kulp, Ilse, Dr.,
 82335, Berg, DE**

**Hu, J.; Kaparias, I.; Bell, M.G.H.; Spatial
 economics models for congestion prediction
 with in-vehicle route guidance. In: IET Intelligent
 Transport Systems, Vol. 3, Iss. 2, pp. 159-167,
 2009.**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:

DE 10 2009 020 054 B3
DE 100 62 856 A1
DE 102 04 677 A1
DE 10 2006 052 319 A1

**Javed, S. et al.; Computational Simulation
 of a Macroscopic Traffic Model for Highways in
 Pakistan. In: IEEE ICMI, pp. 1182-1187, 2010.**

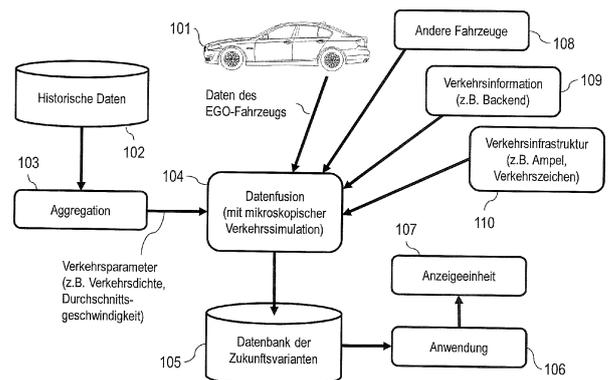
**Kai, C. and Mo, Z.; Design of Real-time Traffic
 Information Prediction and Simulation System
 based on AOSVR and On-line Learning. In: IEEE
 ICVES, pp. 189-193, 2006.**

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Prognose einer Verkehrssituation für ein Fahrzeug**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zur Prognose einer Verkehrssituation für ein Fahrzeug vorgeschlagen, bei dem anhand eines aktuellen Zustands des Fahrzeugs und anhand historischer Daten mindestens eine mögliche Zukunft für die Verkehrssituation des Fahrzeugs bestimmt wird. Weiterhin werden eine entsprechende Vorrichtung sowie ein Fahrzeug mit einer solchen Vorrichtung angegeben.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Prognose einer Verkehrssituation für ein Fahrzeug sowie eine zugehörige Vorrichtung. Weiterhin wird ein Fahrzeug mit einer derartigen Vorrichtung vorgeschlagen.

[0002] Bekannt sind eine Kommunikation von Fahrzeug zu Fahrzeug sowie eine Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur (auch bezeichnet als C2X-Kommunikation), Verkehrsfluss-Simulationsverfahren sowie Verfahren zur Erkennung von Störungen (z. B. zur Stauerkennung). Bestimmte Daten betreffend den Verkehrsfluss können verwendet werden, um Aktionen in einem Fahrzeug zu steuern. Beispielsweise ist es bekannt, sogenannte Floating-Car-Daten bzw. erweiterte Floating-Car-Daten in einem Fahrzeug auszuwerten (siehe auch http://de.wikipedia.org/wiki/Floating_Car_Data).

[0003] Ferner sind Sequenzielle Monte-Carlo-Methoden (SMC-Methoden) bekannt (http://de.wikipedia.org/wiki/Sequenzielle_Monte-Carlo-Methode), die zur Klasse der stochastischen Verfahren zur Zustandsschätzung in einem dynamischen Prozess (z. B. in der mobilen Robotik), dessen Dynamik nur im statistischen Mittel bekannt ist (wesentliche Störgrößen) und der nur unvollständig beobachtet werden kann (Unterteilung in innere, verborgene und äußere, sichtbare Variable), gehören. Ein Anwendungsbeispiel ist die genaue und kontinuierlich aktualisierte Bestimmung des Ortes und der Geschwindigkeit eines Objektes aufgrund einer ungenauen und fehlerhaften Messung des Ortes (vgl. Tracking). SMC-Filter sind auch bekannt als Partikel-Filter, sampling importance resampling (SIR), sequential importance sampling (SIS), bootstrap filters, condensation trackers, interacting particle approximations oder survival of the fittest.

[0004] Hierbei ist es von Nachteil, dass kein verlässlicher Rückschluss auf einen kurzfristig bevorstehenden Zustand eines Fahrzeugs in dessen jeweiliger Verkehrssituation möglich ist.

[0005] Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, die vorstehend genannten Nachteile zu vermeiden und insbesondere eine effiziente Lösung zur Prädiktion einer Verkehrssituation für ein Fahrzeug anzugeben.

[0006] Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich auch aus den abhängigen Ansprüchen.

[0007] Zur Lösung der Aufgabe wird ein Verfahren zur Prognose einer Verkehrssituation für ein Fahrzeug angegeben, bei dem anhand eines aktuellen Zustands des Fahrzeugs und anhand historischer Daten mindestens eine mögliche Zukunft für die Verkehrssituation des Fahrzeugs bestimmt wird.

[0008] Bei den historischen Daten handelt es sich insbesondere um Daten ohne einen Aktualitätsbezug. Die historischen Daten können von unterschiedlichen Quellen (z. B. Fahrzeugen, Infrastruktur, etc.) stammen und für ein Gebiet (z. B. eine Straße, ein Streckenabschnitt, etc.) als Information gespeichert werden. Die historischen Daten können zusätzlich nach Zeit und/oder Gebiet sortiert bzw. segmentiert werden. Insbesondere können im Hinblick auf unterschiedliche Daten Profile erstellt werden, z. B. eine Verkehrsdichte über eine Strecke und/oder Zeit.

[0009] Die vorgestellte Lösung ermöglicht es, für eine zeitlich begrenzte Zukunft eines Fahrzeugs (auch bezeichnet als EGO-Fahrzeug) eine oder mehrere mögliche Verkehrssituationen zu prognostizieren. Dies kann basierend auf historischen Daten und einem aktuellen Zustand des Fahrzeugs beruhen. Ergänzend können weitere Daten berücksichtigt werden, um die Qualität der Prognose zu verbessern. Auch kann aus den mehreren möglichen zukünftigen Verkehrssituationen eine für das Fahrzeug am besten passende Verkehrssituation selektiert werden. Diese am besten passende Verkehrssituation kann verwendet werden, um ein bestimmtes Ereignis zu erkennen und eine entsprechende Aktion zu veranlassen.

[0010] Eine Weiterbildung ist es, dass der aktuelle Zustand des Fahrzeugs mindestens einen der folgenden Parameter umfasst:

- eine Position des Fahrzeugs;
- eine Geschwindigkeit des Fahrzeugs;
- eine zu fahrende Strecke;
- eine Richtung;
- ein Ziel.

[0011] Bei dem Ziel kann es sich z. B. um ein (nahes) Zwischen- oder um ein Endziel handeln.

[0012] Der aktuelle Zustand des Fahrzeugs kann z. B. mittels der Bordsensorik des Fahrzeugs, z. B. eines Bussystems und/oder einer Steuereinheit, bestimmt werden.

[0013] Eine andere Weiterbildung ist es, dass die historischen Daten mindestens einen der folgenden Parameter umfassen:

- eine Verkehrsdichte;
- eine Durchschnittsgeschwindigkeit;
- einen Geschwindigkeitsverlauf;
- eine Reisezeit;
- einen Verkehrszyklus, insbesondere einen Ampelzyklus;
- eine Verkehrsstärke;
- eine Verkehrslage.

[0014] Bei der Verkehrslage handelt es sich insbesondere um mindestens einen Verkehrszustand, z. B. ein gemittelter Zustand über einen vorgegebenen Streckenabschnitt (z. B. Abschnitte, die durch angrenzende TMC-Locations definiert sind).

[0015] Die historischen Daten können z. B. von einer zentralen Einheit (Backend) eines Fahrzeugherstellers und/oder Diensteanbieters gesammelt bzw. bereitgestellt werden. Die historischen Daten können Daten von mehreren Fahrzeugen sein.

[0016] Insbesondere ist es eine Weiterbildung, dass die historischen Daten von unterschiedlichen Fahrzeugen aggregiert werden.

[0017] So können die Daten z. B. basierend auf Zellen eines Gitternetzes, das einem Bereich einer Karte entspricht, zu Profilen verdichtet werden. Durch eine derartige Aggregation können zeitabhängige Profilinformationen entstehen, die einer Vielzahl von Fahrzeugen bereitgestellt werden.

[0018] Auch ist es eine Weiterbildung, dass die historischen Daten an das Fahrzeug über eine mobile Kommunikationsschnittstelle übertragen werden.

[0019] Grundsätzlich sind unterschiedliche Kommunikationsschnittstellen zur Übertragung von (historischen und sonstigen) Daten möglich. Beispielfhaft genannt seien Mobilfunk, Bluetooth, WiFi, Radar, etc. Auch kann eine Übertragung bzw. Aktualisierung von Daten zumindest teilweise über eine physikalische Verbindung, z. B. ein Ladekabel, erfolgen.

[0020] Ferner ist es eine Weiterbildung, dass die mindestens eine mögliche Zukunft des Fahrzeugs auch bestimmt wird anhand mindestens einer der folgenden Informationen:

- eine Information von mindestens einem anderen Fahrzeug;
- eine Information von einer Verkehrsinfrastruktur-Komponente;
- eine Information von einer Verkehrszentrale;
- eine Verkehrsinformation;
- eine Information von einer digitalen Karte;
- eine Information eines Fahrassistenzsystems;
- Online-Daten.

[0021] Bei der Verkehrsinfrastruktur-Komponente kann es sich um eine Verkehrszeichenanlage (z. B. eine Ampel), einen Bahnübergang, eine Verkehrsüberwachungs- oder eine Beobachtungseinheit o. ä. handeln. Die Online-Daten können z. B. über das Internet abrufbar sein (der Zugang kann mittels der o. g. mobilen Kommunikationsschnittstelle hergestellt werden).

[0022] Im Rahmen einer zusätzlichen Weiterbildung wird die mindestens eine mögliche Zukunft des Fahrzeugs auch mittels eines Zeitfensters bestimmt, wobei anhand des Zeitfensters der Zustand des Fahrzeugs für einen vorgegebenen vergangenen Zeitraum erfasst wird.

[0023] Insbesondere kann das Zeitfenster einen Zeitraum bestimmen, der sich von der Gegenwart für eine vorgegebene Zeitdauer in die Vergangenheit erstreckt. Beispielsweise kann das Zeitfenster einen Zeitraum von 10 s bis 300 s aufweisen.

[0024] Eine nächste Weiterbildung besteht darin, dass die mögliche Zukunft für die Verkehrssituation des Fahrzeugs mindestens eine der folgenden Möglichkeiten (ggf. mit einer zugehörigen Unsicherheit bzw. Risikoabschätzung) umfasst:

- eine Position eines Stauendes;
- ein künftiger Geschwindigkeitsverlauf;
- ein künftiger Beschleunigungsverlauf;
- eine Wartezeit und Staulänge vor einer Verkehrsanlage;
- eine grüne Welle oder eine Geschwindigkeitsstrategie bei Annäherung an eine Verkehrsanlage;
- eine Geschwindigkeitsempfehlung für sicheres oder effizientes Fahren.

[0025] Bei der möglichen Zukunft für die Verkehrssituationen kann es sich um Prognosen und/oder Handlungen handeln.

[0026] Eine Ausgestaltung ist es, dass die mindestens eine mögliche zukünftige Verkehrssituation für eine kurzfristige Zukunft des Fahrzeugs mittels einer Simulation bestimmt wird.

[0027] Die kurzfristige Zukunft betrifft z. B. einen Zeitraum bis zu zwei Minuten. Insbesondere kann die Simulation mehrere Simulationsdurchläufe aufweisen, so dass eine Vielzahl von Trajektorien für das EGO-Fahrzeug bestimmt werden kann.

[0028] Bei der Simulation kann es sich um eine sog. Monte-Carlo-Simulation handeln (Partikelfilter-Simulation): Das Partikelfilter gehört zur Klasse der stochastischen Verfahren zur Zustandsschätzung in einem dynamischen Prozess, der nur unvollständig beobachtet werden kann. Mittels des Partikelfilters kann eine aktuelle aber unbekannte Wahrscheinlichkeitsdichte für einen Zustandsraum geschätzt werden, um daraus Aussagen über den weiteren Verkehrsverlauf abzuleiten.

[0029] Mittels des Partikelfilters wird eine Wolke bzw. ein Schwarm sogenannter Partikel erzeugt, die Punkte im Zustandsraum darstellen sollen. Jedes Partikel wird einem Gewicht zugeordnet. Dabei stellt der Schwarm als Ganzes die Wahrscheinlichkeitsdichte dar. Ausgehend von einem Anfangszustand wird jedem einzelnen Partikel mittels eines stochastischen Modells der Systemdynamik eine oder mehrere Lösungskurven zugeordnet. Es handelt sich dabei um eine sogenannte Monte-Carlo-Simulation, da in die zeitliche Entwicklung des Systems zufällige Störgrößen eingehen. Je nachdem, wie die aus der jeweiligen Lösungskurve abgeleiteten Vorhersagen der Messwerte mit den tatsächlichen Messwerten übereinstimmen, kann das Gewicht des Partikels angepasst werden, woraus sich iterativ eine verbesserte Schätzung der Evolution der Wahrscheinlichkeitsdichte im Zustandsraum ergibt. Hoch gewichtete Partikel können auch entsprechend ihres Gewichts "vermehrt" werden.

[0030] Eine Ausführungsform besteht darin, dass die Simulation mittels eines mikroskopischen Modells und/oder eines makroskopischen Modells für einen Verkehrsablauf durchgeführt wird.

[0031] Eine nächste Ausgestaltung ist es, dass das mikroskopische Modell Vorschriften zur Simulation einer Bewegung eines Fahrzeugs unter einer Berücksichtigung der Bewegungen der übrigen Fahrzeuge umfasst.

[0032] Auch ist es eine Ausgestaltung, dass anhand des makroskopischen Modells der Verkehrsablauf als eine Art Flüssigkeit mit vorgegebenen Anfangsbedingungen und/oder Randbedingungen modelliert wird.

[0033] So hängt beispielsweise die zu einem bestimmten Zeitpunkt errechnete Beschleunigung eines virtuellen Fahrzeugs einerseits (mikroskopisch) vom Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie von der Geschwindigkeit des eigenen und des vorausfahrenden Fahrzeugs ab. Andererseits versuchen die Fahrzeuge entsprechend des makroskopischen Modells eine aus historischen Daten geschätzte, vorgegebene, räumlich abhängige Geschwindigkeitscharakteristik zu erreichen.

[0034] Eine Weiterbildung besteht darin, dass anhand der Simulation ein zukünftiger Verkehrsfluss in Fahrtrichtung des Fahrzeugs bestimmt wird.

[0035] Anhand der Simulation kann ein zukünftiger Verkehrsfluss in Fahrtrichtung des Fahrzeugs (in Richtung der von dem Fahrzeug möglichen befahrenen Strecke, auch bezeichnet als "stromabwärts") bestimmt werden. Insbesondere kann die Simulation mehrere Simulationsdurchläufe aufweisen, um die mehreren zukünftig möglichen Verkehrssituationen zu bestimmen.

[0036] Demgemäß wird ein stochastisches Verfahren zur Zustandsschätzung in einem dynamischen Prozess vorgeschlagen, wobei der dynamische Prozess selbst auch unvollständig beobachtet werden kann. Mit Hilfe der vorhandenen Beobachtungen (in Form von Daten) und unter Verwendung eines geeigneten Prozessmodells kann ein unbekannter Zustand geschätzt und für die Prognose (mit-)berücksichtigt werden.

[0037] Eine zusätzliche Ausgestaltung ist es, dass im Rahmen der Simulation Daten von mindestens einem weiteren (Probe-)Fahrzeug auf ein virtuelles Fahrzeug abgebildet und entsprechend der historischen Daten sowie möglicher weiterer Daten virtuelle Fahrzeuge zur Abbildung eines entsprechenden Verkehrsflusses generiert und deren Auswirkungen auf das (EGO-)Fahrzeug bestimmt werden.

[0038] Mit Hilfe einer stochastischen Verkehrssimulation kann eine repräsentative Sammlung wahrscheinlicher Verläufe generiert und z. B. in Form einer Datenbank dem Fahrzeug (EGO-Fahrzeug) zur Bestimmung der Trajektorie(n) bereitgestellt werden. Anhand der Datenbank ist es möglich, Einzelprognose, Unschärfen von Prognosen, räumliche Verteilungen von Risiken, Geschwindigkeitsvariationen und andere statistische Merkmale zu bestimmen.

[0039] Der Ansatz ermöglicht es, die Sicherheit des Nutzers in dem EGO-Fahrzeug und/oder die Energieeffizienz zu erhöhen. Weiterhin ist es möglich, Komfortfunktionen für den Nutzer zu verbessern oder gar zu ermöglichen (Vorhersage einer Ampelphase bei Ankunft an der Ampel, Abschätzung der Wartezeit, Nutzung der Wartezeit durch Präsentation multimedialer Inhalte, etc.).

[0040] Eine andere Ausgestaltung ist es, dass mehrere zukünftige Verkehrssituationen für das Fahrzeug bestimmt werden und diejenige Verkehrssituation ausgewählt wird, die mittels einer Gütefunktion als die am besten passende Verkehrssituation für das Fahrzeug ermittelt wird.

[0041] Auch ist es eine Möglichkeit, dass basierend auf der am besten passenden Verkehrssituation eine vorgegebene Aktion ausgeführt wird.

[0042] Die vorgegebene Aktion kann abhängig von einer Anwendung des Fahrzeugs ausgeführt werden.

[0043] Auch ist es eine weitere Ausgestaltung, dass die vorgegebene Aktion mindestens eine der folgenden Möglichkeiten umfasst:

- eine optische Rückmeldung;
- eine haptische Rückmeldung;
- eine Eingriff in die Steuerung des Fahrzeugs;
- ein Herstellen einer Kommunikationsverbindung;
- ein Übermitteln einer Nachricht.

[0044] Eine andere Weiterbildung ist es, dass die mögliche Zukunft für die Verkehrssituation des Fahrzeugs eine Trajektorie und/oder einen Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeugs umfasst.

[0045] Die vorstehend genannte Aufgabe wird auch gelöst durch eine Vorrichtung zur Bereitstellung einer Prognose einer Verkehrssituation für ein Fahrzeug mit einer Verarbeitungseinheit, die derart eingerichtet ist, dass anhand eines aktuellen Zustands des Fahrzeugs und anhand historischer Daten mindestens eine mögliche Zukunft für die Verkehrssituation des Fahrzeugs ermittelbar ist.

[0046] Die hier genannte Verarbeitungseinheit kann insbesondere als eine Prozessoreinheit und/oder eine zumindest teilweise festverdrahtete oder logische Schaltungsanordnung ausgeführt sein, die beispielsweise derart eingerichtet ist, dass das Verfahren wie hierin beschrieben durchführbar ist. Besagte Verarbeitungseinheit kann jede Art von Prozessor oder Rechner oder Computer mit entsprechend notwendiger Peripherie (Speicher, Input/Output-Schnittstellen, Ein-Ausgabe-Geräte, etc.) sein oder umfassen.

[0047] Die vorstehenden Erläuterungen betreffend das Verfahren gelten für die Vorrichtung entsprechend. Die Vorrichtung kann in einer Komponente oder verteilt in mehreren Komponenten ausgeführt sein.

[0048] Auch wird zur Lösung der obigen Aufgabe ein Fahrzeug vorgeschlagen, das eine Vorrichtung wie hierin beschrieben aufweist.

[0049] Die hier vorgestellte Lösung umfasst ferner ein Computerprogrammprodukt, das direkt in einen Speicher eines digitalen Computers ladbar ist, umfassend Programmcodeanteile, die dazu geeignet sind, Schritte des hier beschriebenen Verfahrens durchzuführen.

[0050] Weiterhin wird das oben genannte Problem gelöst mittels eines computerlesbaren Speichermediums, z. B. eines beliebigen Speichers, umfassend von einem Computer ausführbare Anweisungen (z. B. in Form von Programmcode), die dazu geeignet sind, dass der Computer Schritte des hier beschriebenen Verfahrens durchführt.

[0051] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnungen dargestellt und erläutert.

[0052] Es zeigen:

[0053] [Fig. 1](#) eine schematische Anordnung zur Veranschaulichung einer effizienten Prognose für ein EGO-Fahrzeug;

[0054] [Fig. 2](#) ein schematisches Schaubild für eine beispielhafte Implementierung der vorgeschlagenen Lösung.

[0055] Um eine passende Vorhersage erstellen zu können, werden vorzugsweise verschiedene Informationsquellen berücksichtigt, z. B. historische Geschwindigkeitsprofile, C2X-Informationen (z. B. Informationen von anderen Fahrzeugen, von Infrastruktur-Elementen, von Verkehrszentralen), Informationen einer Bordsensorik (des aktuellen Fahrzeugs und/oder anderer Fahrzeuge), Verkehrsinformationen, digitale Kartendaten, Daten von Fahrerassistenzsystemen und/oder Online-Daten (z. B. über eine mobile Internet-Verbindung verfügbare oder abfragbare Daten).

[0056] Es wird vorgeschlagen, ausgehend von einem aktuellen Fahrzustand eines aktuell betrachteten Fahrzeugs (auch bezeichnet als EGO-Fahrzeug) und z. B. auf Basis (geeigneter) historischer Geschwindigkeitsprofile die verfügbaren Daten im Rahmen wiederholter Verkehrsfluss-Simulationen zu verwenden, um zunächst auf eine kurzfristige zukünftige Fahrzeugdynamik zu schließen. Die Verkehrsfluss-Simulation erfolgt beispielsweise unter Berücksichtigung stochastischer Elemente und liefert, vorzugsweise mit Hilfe eines Partikelfilters, eine geschätzte Wahrscheinlichkeitsverteilung des lokalen Verkehrsgeschehens.

[0057] Basierend auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung können unter anderem folgende Informationen für das EGO-Fahrzeug bereitgestellt bzw. verbessert werden:

- eine Position eines Stauendes mit einer zugehörigen Risikoschätzung,
- ein künftiger Geschwindigkeitsverlauf,
- ein künftiger Beschleunigungsverlauf,
- eine Wartezeit und Staulänge vor Verkehrsanlagen, z. B. Ampeln,
- eine grüne Welle bzw. eine Geschwindigkeitsstrategie bei Annäherung an eine Verkehrsanlage, z. B. Ampel,
- eine Geschwindigkeitsempfehlung für sicheres und effizientes Fahren.

[0058] Für diese Zusammenführung der Daten wird die Tatsache ausgenutzt, dass Verkehr sich nicht vollständig zufällig verhält, sondern bestimmten Regeln folgt. Beispielsweise tauchen Fahrzeuge nicht an einem Punkt B aus dem Nichts aus, sie müssen sich von einem Punkt A aus dorthin bewegen. Außerdem wiederholen sich Verkehrsmuster in einem vorgegebenen Straßennetz normalerweise bezüglich Tageszeit und/oder Wochentag. Ein Beispiel dafür ist die höhere Verkehrsdichte während einer Stoßzeit.

[0059] Diese Muster können anhand von bereits vorliegenden (z. B. zuvor aufgenommenen) historischen Geschwindigkeitsprofilen abgeleitet werden.

[0060] Bekannte Informationen und Daten können unter Verwendung eines stochastischen simulationsbasierten Ansatzes zusammengeführt werden, um mindestens eine Prognose für das EGO-Fahrzeug abzuleiten. Ausgehend von dem aktuellen Zustand der Umgebung des EGO-Fahrzeugs werden mehrere mögliche zukünftige Bewegungsprofile mittels mehrerer simulierter Verkehrsdurchläufe bestimmt. Die Bewegungsprofile können gemäß der Information über die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft gewichtet werden. Hierbei können reale Zukunftsinformationen wie etwa eine Länge zukünftiger Signalphasen, die von einer Ampel bereitgestellt (z. B. gesendet) werden und/oder historische Daten (und hieraus abgeleitete Informationen) be-

rücksichtigt werden. Ergebnisse können gewichtet werden und es ist möglich, Aussagen über die Möglichkeit eines Auftretens oder Nichtauftretens von bestimmten zukünftigen Ereignissen zu treffen. Beispielsweise kann ein Geschwindigkeitsprofil bestimmt werden, anhand dessen bevorstehende Verkehrereignisse komfortabel, sicher und effizient bewältigt werden können.

[0061] So kann ein Straßenabschnitt vor dem EGO-Fahrzeug berücksichtigt werden, wobei die Simulationen vorzugsweise schneller als in Echtzeit ablaufen sollte, um möglichst viele Bewegungsprofile zu erzeugen und trotzdem eine Vorhersagen in Echtzeit zu erlauben.

[0062] Ein Maß für eine Qualität gibt vorzugsweise an, wie gut ein System seine Aufgabe erfüllt. Im vorliegenden Fall kann die Nützlichkeit einer agierenden Einheit (z. B. des EGO-Fahrzeugs oder einer Steuereinheit) erhöht werden, indem Situationen, in denen die Nützlichkeit verringert wird, vermieden werden. Solch eine Situation kann als ein Ereignis beschrieben werden, das die Wahlmöglichkeiten einer agierenden Einheit auf eine Weise begrenzt, die sie dazu zwingt, eine Aktion durchzuführen, die sie nicht ausgeführt hätte, wenn sie das Ereignis vorher gekannt hätte. Beispielsweise betrachtet sei ein Ereignis "Straße durch Felsbrocken blockiert": Je früher das EGO-Fahrzeug das Ereignis erkennt, desto mehr Zeit steht für eine Reaktion zur Verfügung. Wird das Ereignis sehr früh erkannt, gibt es eine Vielzahl möglicher Reaktionen (z. B. Umfahren) als bei einer späten Erkennung (z. B. Einleiten einer Notbremsung). Es kann bei der frühen Erkennung also diejenige Reaktion gewählt werden, die im Hinblick auf eine Zielfunktion noch den größten Nutzen verspricht.

[0063] Ein Verkehrsfluss ist bei einer Betrachtung in einem Maßstab zwischen 50 m und 200 m ein unsicherer, scheinbar verrauschter Prozess mit großen Schwankungen und Fluktuationen. Es wird vorgeschlagen, eine Systematik in dem Prozess zu entdecken und auf diese Weise die Vorhersagbarkeit des Verkehrs selbst bei einer relativ feinen Auflösung (Granularität) zu verbessern. Beispielsweise ist es möglich, wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden einzusetzen, um eine nahe Zukunft für das EGO-Fahrzeug vorherzusagen und entsprechende Aktionen hieraus abzuleiten bzw. anzubieten.

[0064] [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Anordnung zur Veranschaulichung einer effizienten Prognose für ein EGO-Fahrzeug **101**.

[0065] Als Eingangsdaten werden historische Daten **102** (Fahrdaten ohne Aktualitätsbezug, die von dem EGO-Fahrzeug und/oder von anderen Fahrzeugen stammen), Daten des EGO-Fahrzeugs **101**, Daten von anderen Fahrzeugen **108**, Verkehrsinformationen **109** sowie Daten einer Verkehrsinfrastruktur **110** genutzt. Die Daten von anderen Fahrzeugen **108** können Daten von solchen Fahrzeugen umfassen, die stromabwärts aus Sicht des EGO-Fahrzeugs **101** unterwegs sind, wobei diese Daten dem EGO-Fahrzeug **101** mittels C2C-Kommunikation (direkt oder über einen zentralen Server z. B. im Backend eines Fahrzeugherstellers oder Diensteanbieters) bereitgestellt werden können.

[0066] Die historischen Daten **102** können von unterschiedlichen Fahrzeugen gesammelt, ggf. abhängig von Zellen strukturiert ("geclustert") und in einer zentralen oder verteilten Datenbank gespeichert werden. Die historischen Daten **102** können mittels einer Aggregation **103** zusammengeführt werden, um daraus Simulationsparameter wie z. B. eine Verkehrsdichte oder eine Durchschnittsgeschwindigkeit abzuleiten. Die aggregierten Daten werden einer Datenfusion **104** (Zusammenführung der Daten) bereitgestellt, um mittels einer Simulation und einer Gütefunktion eine Aussage über Trajektorien des EGO-Fahrzeugs **101** zu ermöglichen. Auch die Daten des EGO-Fahrzeugs **101**, der anderen Fahrzeuge **108**, die Verkehrsinformation **109** und die Daten der Verkehrsinfrastruktur **110** werden (sofern verfügbar) der Datenfusion **104** bereitgestellt.

[0067] Die Daten des EGO-Fahrzeugs **101** umfassen beispielsweise eine Position und eine Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs **101**. Sie können über Sensoren des EGO-Fahrzeugs **101**, z. B. durch Zugriff auf einen CAN-Bus in dem Fahrzeug, bestimmt werden. Die Position kann eine kartenangepasste und gefilterte GPS-Position sein.

[0068] Die Simulation nutzt die bereitgestellten Daten (das gesammelte Wissen), um (virtuelle) Fahrzeuge zu erzeugen. Insbesondere Positionen und Geschwindigkeiten von stromabwärts befindlichen Fahrzeugen können direkt auf ein bestimmtes virtuelles Fahrzeug in der Simulation abgebildet werden. Es ergeben sich in der Simulation also Fahrzeuge, die zumindest für einen gewissen Zeitraum einem realen anderen Fahrzeug (auch bezeichnet als Probe-Fahrzeug) entsprechen, sowie virtuelle Fahrzeuge. Anhand der Fahrzeuge in der Simulation wird die vorgegebene Verkehrsdichte entsprechend der Verkehrsparameter vorgegeben.

[0069] So können die virtuellen Fahrzeuge genutzt werden, um Ausbreitungen von Verkehrseignissen, z. B. Autoschlangen, Staus oder Verdichtungen anhand der Simulation zu ermitteln.

[0070] Sobald die Simulation definiert ist, kann mittels wiederholter Simulationsdurchläufe eine stochastische Beschreibung generiert werden, in welcher repräsentative Muster aus den Fahrer- und Verkehrseigenschaftsmodellen abgeleitet werden. So kann ein Maß für die Unsicherheit/Sicherheit bestimmt werden und eine Risikobewertung bzw. Wahrscheinlichkeitsanalyse unterstützt werden. Beispielsweise werden für jeden Simulationsdurchlauf die Geschwindigkeitsprofile der virtuellen Fahrzeuge an das vergangene Profil des EGO-Fahrzeugs angepasst. Die Anpassung wird unter Verwendung einer Gütefunktion durchgeführt, die die zuletzt bestimmte Geschwindigkeit und das Fahrzeitprofil des EGO-Fahrzeugs berücksichtigt. Das Profil mit der besten Übereinstimmung wird als die virtuelle Darstellung des tatsächlichen EGO-Fahrzeugs angenommen. Dementsprechend wird das zukünftige Verhalten dieses am besten passenden virtuellen Fahrzeugs als die beste Vorhersage für das EGO-Fahrzeug betrachtet.

[0071] Die Vorhersagen aus den Simulationsdurchläufen werden in einer Datenbank **105** gespeichert. Aufgrund der verschiedenen Parametersätze jedes Durchlaufs enthält die Datenbank **105** somit mehrere mögliche Versionen der nahen Zukunft für das EGO-Fahrzeug **101**. Eine Anwendung **106** kann die Datenbank **105** nutzen, um die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein bestimmtes Ereignis stattfindet, zu bestimmen. Die Anwendung **106** kann daraufhin eine vorgegebene Aktion einleiten bzw. durchführen und/oder auf einer Anzeigeeinheit **107** eine entsprechende Meldung z. B. für den Fahrer des EGO-Fahrzeugs **101** ausgeben. Dies ermöglicht beispielsweise eine fahrer- und situationsangepasste Information in dem EGO-Fahrzeug **101**.

[0072] Zum Beispiel kann eine Anwendung **106** "Notbremsungswarnung" die Datenbank **105** nach Geschwindigkeitsprofilen abfragen, die ein Abbremsen um mehr als einen vorgegebenen Grenzwert enthalten. Falls es eine statistisch signifikante Häufung solcher Ereignisse an einem Ort gibt, kann eine Warnung auf der Anzeigeeinheit **107** ausgegeben werden. Alternativ oder zusätzlich kann mit einer Anwendung **106** "Notbremsassistent" ein entsprechender Bremsvorgang eingeleitet oder durchgeführt werden.

[0073] [Fig. 2](#) zeigt eine beispielhafte Implementierung der vorgeschlagenen Lösung für das EGO-Fahrzeug **101**.

[0074] Die Anwendung **106** erhält Fahrzeugdaten **201**, d. h. Informationen über den aktuellen Zustand des EGO-Fahrzeugs **101**, z. B. über den CAN-Bus. Eine externe Kommunikationsschnittstelle verbindet das EGO-Fahrzeug **101** mittels eines UMTS-Routers **202** über das Internet **203** mit einem Backend-Server **204**. Der Backend-Server **204** sammelt z. B. historische Daten von mehreren entsprechend ausgerüsteten Fahrzeugen, speichert diese und stellt die gespeicherte Information den Fahrzeugen bereit. Ein solch zentrales Speichern der Daten hat den Vorteil, dass jedes Fahrzeug neben den eigenen historischen Daten auch auf historische Daten anderer Fahrzeuge zugreifen kann. Insbesondere können die Daten von dem Backend-Server **204** verarbeitet und z. B. in Form stochastischer Profile angeboten werden.

[0075] Optional kann der Backend-Server **204** als ein Nachrichten-Relais agieren und den aktuellen Zustand jedes verbundenen Fahrzeugs an alle Fahrzeuge verteilen, die an dieser Information interessiert sein könnten.

Weiterführende Betrachtungen

[0076] Durch die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander (C2C) oder mit einer Infrastruktur (C2I) können Verkehrssicherheit, Effizienz und/oder Komfort gesteigert werden. Basierend auf unterschiedlichen Daten, z. B. C2C-Daten, C2I-Daten, historischen Fahrprofilen (von dem aktuellen Fahrzeug und/oder von anderen Fahrzeugen), (erweiterten) Floating-Car-Daten sowie sonstigen Datenquellen sollen eine Trajektorie und/oder ein Geschwindigkeitsverlauf für das EGO-Fahrzeug bestimmt werden. So kann mittels unterschiedlicher Informationsquellen durch eine entsprechende Fusion der verfügbaren Daten kurzfristige Prognosen betreffend die Fahrsituation des EGO-Fahrzeugs (Prognose der Trajektorie des EGO-Fahrzeugs) erzeugt werden.

[0077] Hierbei kann die Trajektorie des EGO-Fahrzeugs nicht vollständig bzw. mit einer unterschiedlich großen Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens prognostiziert werden. So ist die Trajektorie des EGO-Fahrzeugs Teil eines dynamischen Gesamtsystems, viele Fahrzeuge sowie Einheiten der Infrastruktur sind autonome Einheiten, deren Verhalten selbst nur grob (mit Unsicherheiten behaftet) vorherbestimmt werden kann.

[0078] Vorzugsweise erfolgt daher die Prognose für das EGO-Fahrzeug basierend auf einem Verkehrsverlauf während eines vorgegebenen zeitlichen Intervalls (auch bezeichnet als Zeitfenster) z. B. mit einer bestimmten

räumlichen Ausdehnung. Dabei ist es möglich, das zeitliche Intervall bzw. die räumliche Ausdehnung von einer ermittelbaren Unsicherheit der Prognose selbst abhängig zu machen: Je größer der bei der Prognose ermittelte (erwartete) Fehler (Unsicherheit der Berechnung), desto kleiner das Zeitfenster. Auf diese Weise kann z. B. ein ermittelter Fehler stets unterhalb eines vorgegebenen Schwellwerts bleiben, das Zeitfenster wird entsprechend angepasst (mit dem Zeitfenster ergibt sich auch eine von der aktuell betrachteten Geschwindigkeit abhängige räumliche Ausdehnung).

[0079] Es resultiert z. B. ein zu lösendes Anfangs- bzw. Randwertproblem. Weiterhin wird ein Verkehrsablaufmodell vorgestellt, das vorhandene Daten zusammenführen kann und insbesondere fehlende Daten nach Möglichkeit kompensiert.

[0080] Es wird insbesondere ein probabilistischer Lösungsansatz vorgeschlagen. Mit Hilfe einer stochastischen Verkehrssimulation kann eine repräsentative Sammlung wahrscheinlicher Verläufe generiert und z. B. in Form einer Datenbank dem EGO-Fahrzeug zur Bestimmung der Trajektorie(n) bereitgestellt werden. Anhand der Datenbank ist es möglich, Einzelprognose, Unschärfen von Prognosen, räumliche Verteilungen von Risiken, Geschwindigkeitsvariationen und andere statistische Merkmale zu bestimmen.

[0081] Der Ansatz ermöglicht es, die Sicherheit des Nutzers in dem EGO-Fahrzeug und/oder die Energieeffizienz zu erhöhen. Weiterhin ist es möglich, Komfortfunktionen für den Nutzer zu verbessern oder gar zu ermöglichen (Vorhersage einer Ampelphase bei Ankunft an der Ampel, Abschätzung der Wartezeit, Nutzung der Wartezeit durch Präsentation multimedialer Inhalte, etc.).

Zielsetzung, Motivation

[0082] Beispielhaft wird davon ausgegangen, dass der Fahrer des EGO-Fahrzeugs seine Geschwindigkeit und somit seine Trajektorie nicht frei wählen kann. Vielmehr ist dies durch externe Faktoren eingeschränkt bzw. beeinflusst. So muss in einem Verkehrsfluss hintereinander fahrender Fahrzeuge der Fahrer des EGO-Fahrzeugs ständig auf dynamische Einflüsse des vorausfahrenden Verkehrsablaufs reagieren, z. B. seine Geschwindigkeit anpassen. In einem derartigen Szenario wird für den Fahrer des EGO-Fahrzeugs eine Vielzahl von Einflüssen erst unmittelbar (z. B. mit einem Zeithorizont von weniger als 5 Sekunden) erkennbar, so dass er auf Änderungen nur noch reagieren kann.

[0083] Wäre eine kurzfristige Prognose (mit einem Zeithorizont zwischen etwa 5 und 30 Sekunden) des Verkehrsablaufs in Echtzeit vorhanden, so könnte das EGO-Fahrzeug bzw. der Fahrer viele unmittelbare Reaktionen durch geschickte vorausschauende (bzw. strategische) Handlungen vorwegnehmen oder überflüssig machen. Dies würde sich vorteilhaft auf die Verkehrssicherheit sowie einen harmonischeren Verkehrsfluss auswirken. Beispielsweise wäre es möglich, potentielle Gefahrensituationen vorab zu erkennen und die Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs rechtzeitig anzupassen. Vorzugsweise könnten die verfügbaren Informationen auf geeignete Weise aufbereitet werden, um den Wahrnehmungshorizont des Fahrers über den unmittelbaren Sichthorizont hinaus zu erweitern. Auch können entsprechende Aktionen von dem EGO-Fahrzeug autonom bestimmt und dem Fahrer vorgeschlagen oder durchgeführt (und ggf. dem Fahrer angezeigt) werden. Zum Erreichen des erweiterten Zeithorizonts ist es von Vorteil, eine Vielzahl von Daten auswerten zu können, wobei vorzugsweise die Daten eine hohe Zuverlässigkeit (d. h. eine hohe Qualität bzw. einen geringen Prognosefehler) aufweisen.

[0084] Der Ansatz ermöglicht es, die Sicherheit zu erhöhen (für Fahrer und Passagiere des EGO-Fahrzeugs aber auch der anderen Verkehrsteilnehmer), den Energieverbrauch (durch vorausschauende Fahrmanöver) sowie das Energiemanagement in dem EGO-Fahrzeug (Entscheidung über effiziente Rekuperation im Hinblick anstehender Fahrmanöver) zu optimieren. Auch können zusätzliche Komfortanwendungen geschaffen sowie bestehende Komfortanwendungen für Fahrer und Passagiere des EGO-Fahrzeugs verbessert werden.

[0085] Die in dem EGO-Fahrzeug verfügbaren Daten (selbst generiert oder anhand externer Datenquellen verfügbar gemachte Daten) können hierbei zusammengeführt werden derart, dass eine Prognose der (künftigen) Trajektorie des EGO-Fahrzeugs ermittelbar ist. Diese Trajektorie des EGO-Fahrzeugs kann mit Unsicherheiten behaftet sein, wobei die Unsicherheiten insbesondere mit wachsendem Prognosehorizont zunehmen. Prognosen umfassen hierbei insbesondere Wahrscheinlichkeitsverteilungen betreffend z. B. Erwartungswerte der Geschwindigkeit sowie Konfidenzintervalle oder Quantile (also Zeitbereiche, in denen eine Vorhersage mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zutrifft).

[0086] Basierend auf dieser Betrachtung ist es ein Ziel, die verfügbaren Daten so einzusetzen, dass die Prognose der Trajektorie des EGO-Fahrzeugs verbessert wird. Insbesondere soll die Trajektorie (z. B. der Geschwindigkeitsverlauf) des EGO-Fahrzeugs mit einer zugehörigen Prognose-Unschärfe vorausgesagt werden. Vorzugsweise erfolgt dies in Echtzeit oder nahezu in Echtzeit.

[0087] In einem beispielhaften Szenario bremst ein vorausfahrendes Fahrzeug (auch bezeichnet als Probe-Fahrzeug) bis zum Stillstand ab und fährt anschließend wieder an. Das EGO-Fahrzeug hat beispielhaft Zugriff auf bisherige Fahrinformationen (auch des Probe-Fahrzeugs) sowie auf andere Datenquellen. Das Probe-Fahrzeug übermittelt z. B. Datenpakete mit Zeitstempeln, Positionen und Geschwindigkeiten an eine Zentrale, die diese Daten (nach einigen Sekunden Latenzzeit) in das EGO-Fahrzeug weiterleitet.

[0088] Der hier vorgestellte Ansatz umfasst beispielhaft die folgenden Schritte:

- Es wird eine Geschwindigkeitsvorausschau für das EGO-Fahrzeug erzeugt, d. h., eine Geschwindigkeit mit der das EGO-Fahrzeug zu bestimmten Zeitpunkten (etwa in 5, 10, 15, 20 Sekunden) im Verkehrsfluss fahren kann.
- Es wird ermittelt, ob für das EGO-Fahrzeug eine Notwendigkeit zum Abbremsen besteht. In diesem Sinne kann
- eine Position und ein Zeitpunkt für ein Abbremsen mit einer bekannten Unschärfe prognostiziert werden und/oder
- bei einer möglichen starken Bremsverzögerung des vorausfahrenden Verkehrs ggf. eine Warnung generiert werden (alternativ oder zusätzlich kann eine vorgegebene Aktion, z. B. ein entsprechender Bremsvorgang eingeleitet werden).

Prognose

[0089] Die Prognose der zukünftigen Trajektorie des EGO-Fahrzeugs basiert z. B. auf Schätzungen des gegenwärtigen Zustandes des bevorstehenden Verkehrsflusses (auch bezeichnet als Verkehrsfluss stromabwärts) sowie auf Modellen betreffend die dynamische Entwicklung des gegenwärtigen Zustandes. So hat eine Verkehrsdynamik die Eigenschaft, dass sich Störungen im Verkehrsfluss stromaufwärts mit einer gewissen Gesetzmäßigkeit bewegen. Eine derartige Verkehrsdynamik kann erfasst bzw. modelliert werden.

[0090] Demgemäß wird ein stochastisches Verfahren zur Zustandsschätzung in einem dynamischen Prozess vorgeschlagen, wobei der dynamische Prozess selbst auch unvollständig beobachtet werden kann. Mit Hilfe der vorhandenen Beobachtungen (in Form von Daten) und unter Verwendung eines geeigneten Prozessmodells kann ein unbekannter Zustand geschätzt und für die Prognose (mit-)berücksichtigt werden.

[0091] Aufgrund der hohen Dynamik der einzelnen autonomen Teilnehmer am Verkehrsgeschehen ist, wie vorstehend ausgeführt wurde, keine exakte Vorhersage möglich. Allerdings kann eine Bandbreite (oder Unschärfe) der möglichen Verläufe des Verkehrsgeschehens im Rahmen der Prognose ermittelt und auch quantifiziert werden.

[0092] Hierbei werden insbesondere alle oder ein Teil der folgenden Aspekte berücksichtigt:

- eine Notwendigkeit zum Zusammenführen unterschiedlicher Daten(quellen);
- eine vorgegebene Qualität (Schärfe der Prognose) für eine bestimmte Anwendung (z. B. das Einleiten eines automatisierten Bremsvorgangs);
- Anforderungen betreffend eine Performance in einer Datenumgebung im Fahrzeug bzw. in einem Backend, das zumindest zeitweise eine Kommunikationsverbindung mit dem Fahrzeug hat.

[0093] Somit wird vorzugsweise ein stochastisches Verfahren zur Zustandsschätzung in einem dynamischen Prozess, der nur unvollständig beobachtet werden kann, gesucht.

Partikelfilter (Sequenzielle Monte-Carlo-Methode)

[0094] Es wird vorgeschlagen, die wahrscheinlichsten Trajektorien des EGO-Fahrzeugs (Ablaufprognosen mit Unschärfe und Wahrscheinlichkeit) zu bestimmen und z. B. in einer Datenbank zu speichern. So können die Trajektorien unterschiedlichen Anwendungen in dem EGO-Fahrzeug bereitgestellt und entsprechend weiterverarbeitet werden.

[0095] Mindestens eine Anwendung kann auf diese Art zu jedem Zeitpunkt auf die gespeicherten Trajektorien zugreifen und eine passende Strategie, z. B. basierend auf für die jeweilige Anwendung vorgegebenen Regeln,

bestimmen. Bei den Anwendungen kann es sich um eine dynamische Abstandsregelung zu dem vorausfahrenden Fahrzeug (ACC), ein Energiemanagement des Fahrzeugs, einen Bremsassistent oder ein Lademanagement (für eine Batterie des Fahrzeugs, insbesondere bei einem Hybrid- oder Elektrofahrzeug) handeln.

[0096] Das Partikelfilter gehört zur Klasse der stochastischen Verfahren zur Zustandsschätzung in einem dynamischen Prozess, der nur unvollständig beobachtet werden kann. Mittels des Partikelfilters kann eine aktuelle aber unbekannte Wahrscheinlichkeitsdichte für einen Zustandsraum geschätzt werden, um daraus Aussagen über den weiteren Verkehrsverlauf abzuleiten.

[0097] Mittels des Partikelfilters wird eine Wolke bzw. ein Schwarm sogenannter Partikel erzeugt, die Punkte im Zustandsraum darstellen sollen. Jedes Partikel wird einem Gewicht zugeordnet. Dabei stellt der Schwarm als Ganzes die Wahrscheinlichkeitsdichte dar. Ausgehend von einem Anfangszustand wird jedem einzelnen Partikel mittels eines stochastischen Modells der Systemdynamik eine oder mehrere Lösungskurve zugeordnet. Es handelt sich dabei um eine sogenannte Monte-Carlo-Simulation, da in die zeitliche Entwicklung des Systems zufällige Störgrößen eingehen. Je nachdem, wie die aus der jeweiligen Lösungskurve abgeleiteten Vorhersagen der Messwerte mit den tatsächlichen Messwerten übereinstimmen, kann das Gewicht des Partikels angepasst werden, woraus sich iterativ eine verbesserte Schätzung der Evolution der Wahrscheinlichkeitsdichte im Zustandsraum ergibt. Hochgewichtete Partikel können auch entsprechend ihres Gewichts "vermehrt" werden.

[0098] Die Partikelfilter-Methode hat die folgenden Vorteile.

- Es wird die gesamte unbekannte a-posteriori-Wahrscheinlichkeitsdichte geschätzt; der Ansatz ist insbesondere für nicht-Gaußsche (auch bezeichnet als multimodale) Verteilungen anwendbar.
- Systemdynamik und Messdynamik können nichtlinear sein.
- Die Simulation der einzelnen Partikel ist parallel durchführbar (somit ist ein parallelisierbarer Lösungsansatz für die Durchführung der Simulation möglich).

[0099] Im Beispiel der Verkehrssimulation weist der Zustandsraum eine hohe Dimension auf, wobei beispielsweise nur wenige punktuelle Messwerte (die Trajektorien des Ego-Fahrzeugs sowie die Signale des Probe-Fahrzeugs) zur Verfügung stehen, um Gewichte anzupassen bzw. neue Partikel zu erzeugen. Auch ist es möglich, dass die Ressourcen für Berechnungen in dem hochdimensionalen Zustandsraum limitierende Faktoren darstellen. Um die Dimension einzuschränken und Echtzeit-Vorhersagen zu ermöglichen, können C2X-Daten (etwa Signale von mehreren Probe-Fahrzeugen und/oder von einer Verkehrsinfrastruktur, z. B. Ampeln) im Rahmen der Simulation als direkte Einflussfaktoren integriert werden.

Simulation des Verkehrsablaufs: Anforderungen

[0100] Wie vorstehend erwähnt, wird davon ausgegangen, dass der Fahrer des EGO-Fahrzeugs seine Geschwindigkeit und somit seine Trajektorie nicht frei wählen kann. Vielmehr ist dies durch externe Faktoren eingeschränkt bzw. beeinflusst.

[0101] Nun ist es eine Zielsetzung, aus unterschiedlichen Daten, auf die das EGO-Fahrzeug zugreifen kann, die prognostizierte Trajektorie qualitativ zu verbessern (d. h. die Prognoseschärfe zu erhöhen). Hierbei sei angemerkt, dass eine solche Verarbeitung der Daten in dem EGO-Fahrzeug oder in einer anderen (ggf. zentralen) Einheit für das EGO-Fahrzeug durchgeführt werden kann. Im letzteren Fall kann das Ergebnis der Berechnung dem EGO-Fahrzeug zeitnah mitgeteilt werden. Auch kann eine beliebige Aufteilung der Berechnungen auf unterschiedliche Komponenten, von denen eine Komponente das EGO-Fahrzeug sein kann, aufgeteilt werden. Dies ermöglicht z. B. eine verteilte Berechnung komplexer Prognosen basierend auf unterschiedlichen Daten. Insbesondere kann eine Berechnung dort erfolgen, wo Ressourcen für die Berechnung verfügbar sind. Eine Zuteilung der Ressourcen kann auch dynamisch erfolgen.

[0102] Die unterschiedlichen Daten können aus verschiedenen Informationsquellen stammen und unterschiedlicher Natur sein. Nachfolgend sind einige Beispiele genannt:

- Daten von Infrastruktur-Komponenten, z. B. Verkehrszeichenanlagen, Ampeln, etc.
- Daten zu Schaltzeitpunkten von Infrastruktur-Komponenten,
- Daten vorausfahrender Fahrzeuge (Probe-Fahrzeuge), z. B. Trajektorien oder sonstige Daten,
- historische Daten des EGO-Fahrzeugs und/oder mindestens eines Probe-Fahrzeugs,
- historische Daten einer zentralen Datenbank.

[0103] Die Daten können das EGO-Fahrzeug bzw. die zu ermittelnde Trajektorie mehr oder weniger indirekt beeinflussen.

[0104] Grundsätzlich sei angemerkt, dass die Kommunikation zwischen den oben genannten Komponenten (Fahrzeugen, Infrastruktur-Komponenten, Backend, etc.) über unterschiedliche Schnittstellen erfolgen kann. Beispielsweise genannte seien drahtlose Kommunikationsschnittstellen: Mobilfunk, Bluetooth, WiFi, Radar, etc. Auch kann eine Kommunikation über eine Leitung erfolgen (z. B. Herunterladen von Daten über ein Kabel während einer Ladephase einer Batterie des EGO-Fahrzeugs). Zusätzlich kann das EGO-Fahrzeug unterschiedliche Daten generieren und speichern, z. B. Sensordaten von Fahrzeugsensoren oder in dem EGO-Fahrzeug vorhandenen Kameras.

[0105] Zur Modellierung des Verkehrsablaufs gibt es unterschiedliche Lösungsansätze, z. B. in Abhängigkeit von der Modellierungsaufgabe. Beispielsweise können Modelle eingesetzt werden, die mikroskopisch simulieren und makroskopische Einflüsse modellieren können.

[0106] Beispielsweise ergeben sich aus unterschiedlichen Quellen für Daten die folgenden Anforderungen:

- Berücksichtigung von historischen Profilen: Insbesondere können Rückfall-Szenarien vorgesehen sein, falls historische Daten nicht in ausreichendem Maß vorhanden sind;
- Berücksichtigung von Randbedingungen (z. B. Daten über Kreuzungen und Ampelschaltzeitpunkte);
- Berücksichtigung von Geschwindigkeitsverläufen aus Probe-Fahrzeugen; hierbei sollten insbesondere Latenz-Zeiten, die durch die Übertragung entstehen, tolerierbar sein;
- Berücksichtigung von Geschwindigkeitsverläufen aus ACC-Daten (ACC: "adaptive cruise control" = aktive Geschwindigkeitsregelung).

[0107] Beispielsweise ergeben sich für unterschiedliche Anwendungen die folgenden Anforderungen:

- Aussage über starke Bremsvorgänge;
- Aussagen über Wahrscheinlichkeitsverteilungen, etwa für Energieoptimierung und Energiemanagement;
- Aussagen über Wartezeiten;
- der Ansatz soll sowohl auf Autobahnen als auch im städtischen Verkehr nutzbar sein.

Mikroskopische Modelle des Verkehrsablaufs

[0108] Für zentrale und allgemein gültige Aufgaben der Verkehrsplanung umfassend die Dimensionierung von Infrastruktur im Straßenbau, usw. sollen in der Regel repräsentative Abläufe generiert und simuliert werden. Damit können beispielsweise hypothetische Verkehrsregelungen hinsichtlich ihrer Kapazität getestet werden. Hierfür werden oft sogenannte "mikroskopische Modelle" verwendet. Darunter versteht man Vorschriften zur Simulation der Bewegung jedes einzelnen Fahrzeugs unter Berücksichtigung der Bewegungen der übrigen Fahrzeuge.

[0109] Beispielsweise unterstellt ein einfaches Fahrzeugfolgmodell eine Vorschrift zur Bestimmung der Beschleunigung des nächsten ($n + 1$)-ten Fahrzeugs gemäß

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \frac{\lambda}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (1)$$

[0110] Der Koeffizient λ wird durch eine Kalibrierung mit empirischen Daten gewonnen.

[0111] In diesem Fahrzeugfolgmodell werden die Entfernung und die Differenzgeschwindigkeit zum Vordermann (vorausfahrenden Fahrzeug) berücksichtigt. Außerdem wird eine Verzögerung T unterstellt, die die Reaktionsprozesse der Fahrer zum Ausdruck bringen soll.

[0112] Auch komplexere mikroskopische Modelle berücksichtigen hauptsächlich die Entfernung zum Vordermann und die Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs und des Vordermanns. Gelegentlich wird auch das dem Vordermann vorausfahrende Fahrzeug berücksichtigt. In diesem Kontext ist das Programm VISSIM bekannt (<http://de.wikipedia.org/wiki/VISSIM>), das oft für Simulationen neuer Verkehrseinrichtungen verwendet wird.

[0113] Mikroskopische Modelle sind in den letzten Jahren adaptiert und angewandt worden, um die Wirkung von Fahrerassistenzsystemen zu modellieren. Für die Nutzung eines mikroskopischen Modells sind insbesondere die nachfolgenden Aspekte von Bedeutung:

- Eine Integration von Randbedingungen sollte möglichst direkt in die Simulation erfolgen.
- Bei Daten über Kreuzungen und Ampelschaltzeitpunkten könnten mikroskopische Fahrzeugfolgemodelle eingesetzt werden.
- Auch sollten Daten über vorausfahrende Fahrzeuge in der Simulation berücksichtigt werden können. Insofern kann das bekannte mikroskopische Modell um die Berücksichtigung vorgegebener Trajektorien (aus Probe-Fahrzeugen) erweitert werden.
- Die zu berücksichtigenden Daten umfassen auch historische Geschwindigkeitsprofile, die dazu verwendet werden sollen, den Verlauf der Geschwindigkeit auf einer bereits befahrenen Strecke besser schätzen zu können, als dies lediglich mit einer digitalen Karte möglich wäre. Auch diesbezüglich ist eine Erweiterung bekannter mikroskopischer Modelle erforderlich.

Makroskopische Modelle des Verkehrsablaufs

[0114] Um die Verwendung einer vorgegebenen Geschwindigkeitscharakteristik im Rahmen eines Verkehrsmodells zu illustrieren, kann ein makroskopisches Modell zur Beschreibung des Verkehrs eingesetzt werden.

[0115] Makroskopische Verkehrsmodelle unterstellen einen hydrodynamischen Verkehrsablauf, d. h. der Verkehrsfluss wird als eine Art Flüssigkeit modelliert:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(kv) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} v + v \frac{\partial}{\partial x} v = \frac{1}{T_0} (V(k) - v) - \frac{c_0^2}{k} \frac{\partial}{\partial x} k + \frac{1}{k} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \frac{\partial}{\partial x} v) \quad (2)$$

[0116] Es bezeichnen:

x	eine Position,
t	einen Zeitpunkt,
k(x, t)	eine Verkehrsdichte in Fahrzeugen pro Meter,
v(x, t)	eine Verkehrsflussgeschwindigkeit an der Stelle x zu dem Zeitpunkt t in m/s,
μ	eine Diffusion in dem Verkehrsfluss,
c_0	eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit.

[0117] Die Notation bedeutet die partielle Ableitung bezüglich x, usw. Die linke Seite der zweiten Gleichung (2) entspricht einer Beschleunigung (dv/dt) eines hypothetischen mit der Verkehrsflüssigkeit "mitbewegten" Fahrzeugs, das sich an der Stelle x zum Zeitpunkt t befindet. Damit stellt die rechte Seite der Gleichung (2) eine Vorgabe für diese Beschleunigung dar.

[0118] Bezüglich der Hydrodynamik bringen die Terme mit Ableitungen von k Reaktions- und Antizipationsprozesse in dem Verkehrsfluss zum Ausdruck, die für Lösungsansätze geeignet sind.

[0119] In Bezug auf die Geschwindigkeitscharakteristik gilt: Wenn zu einem Anfangszeitpunkt die Verkehrsgeschwindigkeit v(x, 0) und die Verkehrsdichte k(x, 0) räumlich konstant wären mit v = V, dann wäre die Lösung bei konstantem Zufluss bzw. Abfluss stationär. Bei vorgegebener Verkehrsdichte k würde der Verkehrsfluss laut Modell die Geschwindigkeit V(k) anstreben, wenn zu einem Anfangszeitpunkt v(x, t) und k(x, t) räumlich konstant wären.

[0120] Eine differenzierbare Funktion

$$V(k; v_f, L_{Fz}, T_{Reakt})$$

wird als eine "Geschwindigkeitscharakteristik" bezeichnet und hängt in makroskopischen Modellen von der Verkehrsdichte und ggf. von weiteren Parametern ab. Als Beispiel wird ein Modell

$$V(k; v_f, t_{Reakt}, L_{Fz}) = v_f \tanh \left[\frac{k^{-1} - L_{Fz}}{t_{Reakt} v_f} \right] \quad (3)$$

betrachtet, das von den folgenden Parametern abhängt:

V_f	einer Wunschgeschwindigkeit,
L_{Fz}	einer (effektiven) Fahrzeuglänge und
T_{Reakt}	einer (effektiven) Reaktionszeit.

[0121] Um eine Anzahl N Fahrspuren zu berücksichtigen, kann in der Gleichung (3) k durch k/N ersetzt werden.

[0122] Makroskopische Modelle können entweder direkt oder mit Hilfe von Filterverfahren eingesetzt werden, um den Verkehrsfluss mit spezifizierten Randbedingungen zu rekonstruieren. Dazu werden die obigen Gleichungen im Rahmen eines Anfangs-Randwert-Problems gelöst. Hierbei sind als Randbedingungen geeignete Daten am Streckeneingang (Verkehrsfluss und Geschwindigkeit) sowie am Streckenende (etwa Beschleunigung gleich null) vorgebar. Auch Anfangswerte der Dichte und der Geschwindigkeit sind vorgebar. Makroskopische Lösungsansätze für die obigen Gleichungen basieren anschaulich auf einer Diskretisierung der Felder Verkehrsdichte $k(x, t)$ und Geschwindigkeit $v(x, t)$ auf einem mehrdimensionalen Gitter.

[0123] Für die vorgesehenen Anwendungen kann der Verkehrsablauf z. B. auf Autobahnen und auf städtischen Straßen modelliert werden. Letztere weisen wegen dynamisch heterogener Einflüsse und Randbedingungen (Kreuzungen, Ampeln, Abbiegevorgänge, Verengungen, usw.) einen komplexeren Verkehrsablauf auf. Da eben diese Einflüsse in der Regel nicht direkt erfasst werden, ist für eine gute Auflösung und Aussagekraft der Vorausschau eine andere Informationsquelle von Vorteil. Insbesondere können hierfür historische Daten in Form historischer Geschwindigkeitsprofile herangezogen werden. Anstatt wie in dem Modell gemäß der Gleichung (3) eine Geschwindigkeitscharakteristik mit Hilfe der Verkehrsdichte k zu bestimmen, können die erfassten historischen Daten direkt berücksichtigt werden.

Simulation

[0124] Insbesondere wird vorgeschlagen, bekannte Ansätze der mikroskopischen Technik derart zu erweitern, dass kein typischer Ablauf benötigt wird, sondern eine Prognose der aktuellen Trajektorie des EGO-Fahrzeugs erfolgt unter Berücksichtigung der in den vorhandenen Daten dargestellten Einflüsse. Dabei dient ein Modell des Verkehrsablaufs (kurz Verkehrsmodell) im Rahmen eines geeigneten statistischen Verfahrens zur Rekonstruktion und zur Prognose des Ablaufs.

[0125] Beispielsweise werden im Rahmen der Simulation Daten, z. B. Anfangsdaten, Daten von Probe-Fahrzeugen, historische Daten (Profile) und Randbedingungen (z. B. umfassend eine Verkehrsstärke) eingelesen und zur Durchführung eines simulierten Verkehrsablaufs verwendet.

[0126] Hierzu kann die Simulation einzelne virtuelle Fahrzeuge generieren und die Bewegung jedes einzelnen Fahrzeugs modellieren. Die Straße selber kann z. B. als ein Gitter mit Stützstellen (z. B. mit einem Abstand von einem Meter in Längsrichtung) dargestellt werden. Auch ist es möglich, mit Hilfe einer zweidimensionalen Darstellung Querbewegungen wie Spurwechsel zu modellieren.

[0127] Durch den Teilchen-Gitter-Aufbau der Simulation können sowohl mikroskopische Phänomene (etwa geringe TTC-Werte) als auch makroskopische Informationen (etwa Geschwindigkeitsprofile, Krümmungen der Straße, Änderungen der zulässigen Geschwindigkeit) berücksichtigt werden. So hängt die zu einem bestimmten Zeitpunkt errechnete Beschleunigung jedes virtuellen Fahrzeugs einerseits (mikroskopisch) vom Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie von der Geschwindigkeit des eigenen und des vorausfahrenden Fahrzeugs usw. ab. Andererseits versuchen die Fahrzeuge wie in makroskopischen Modellen eine aus historischen Daten geschätzte, vorgegebene, räumlich abhängige Geschwindigkeitscharakteristik zu erreichen.

[0128] TTC-Werte bezeichnen eine Zeit bis ein Fahrzeug theoretisch auf ein vorausfahrendes Fahrzeug auffährt und mit diesem kollidiert (TTC: Time to Collision), wenn beide mit unveränderter Geschwindigkeit weiterfahren würden. Der TTC-Wert ist gleich dem Abstand geteilt durch die Differenzgeschwindigkeit.

[0129] Aufgrund der Streuung von Fahrer- und Fahrzeugmerkmalen ist ein gewisser Grad an Unschärfe selbst bei einer sehr detaillierten mikroskopischen Modellierung vorhanden.

[0130] Daher ist eine exakte Vorhersage der einzelnen Fahrzeugbeschleunigungen nicht möglich. Allerdings ist eine realistische Aussage über die statistischen Verteilungen der Abläufe möglich.

Anfangsbedingungen

[0131] Zunächst werden beispielsweise virtuelle Fahrzeuge generiert, denen Attribute zugeordnet werden:

- Eine maximale Komfortbeschleunigung wird anhand einer Normalverteilung bestimmt (beispielhafte Werte: Mittelwert etwa 4 m/s^2 , Standardabweichung etwa 1 m/s^2);
- Eine Gleichgewichtszeitlücke wird anhand einer logarithmischen Normalverteilung bestimmt mit einem beispielhaften Medianwert von etwa $1,2 \text{ s}$;
- Eine Mindestzeitlücke des Regelbereichs wird in etwa zu 50% der Gleichgewichtszeitlücke mit einer Zufallskomponente bestimmt.

[0132] In einem beispielhaften Szenario beginnt eine Simulation mit dem Empfang eines ersten Signals von einem vorausfahrenden Probe-Fahrzeug. Das Probe-Fahrzeug hat während eines vorgegebenen Zeitintervalls eine Datenreihe (seine Trajektorie) mit Zeitstempel, Positionen, und Geschwindigkeiten bestimmt und sendet diese an das EGO-Fahrzeug. Diese Daten werden einem virtuellen Fahrzeug eingepreßt, d. h. für eines der virtuellen Fahrzeuge der Simulation übernommen. Dieses virtuelle Probe-Fahrzeug wird auch während der Simulation anders als die übrigen virtuellen Fahrzeuge (für die keine Datenreihe erhalten wurde) behandelt. Somit sind Anfangsposition und -geschwindigkeit des virtuellen Probefahrzeugs festgelegt.

[0133] Als Nächstes werden virtuelle Fahrzeuge stromabwärts des Probe-Fahrzeugs erzeugt. Dazu wird zunächst an der gegenwärtigen Position aufgrund des historischen Profils ein Zustand "gebunden" (wahr oder falsch) geschätzt. Gemäß dieser Zustandsschätzung wird eine Zeitlücke anhand der logarithmischen Normalverteilung bestimmt, wobei die Parameter dieser Verteilung von der Zustandsschätzung abhängen. Damit ist eine Position für ein weiteres virtuelles Fahrzeug stromabwärts in Bezug auf das Probe-Fahrzeug z. B. gemäß der SMC-Methode für stochastische Simulation bei bekannten Verteilungen definiert. Die zugeordnete Geschwindigkeit für dieses virtuelle Fahrzeug richtet sich nach dem vorgegebenen historischen Geschwindigkeitsprofil (sie ist dabei vorzugsweise jedoch mindestens so groß wie die Geschwindigkeit des Probe-Fahrzeugs). Eine derartige Zuordnung erfolgt bis zum stromabwärtigen Ende der Strecke.

[0134] Das Ende der Strecke kann z. B. ein Zwischenziel sein oder ein vorgelagerter Punkt, bei dem z. B. ein Abbiegevorgang möglich wäre.

[0135] Anschließend wird stromaufwärts des Probe-Fahrzeugs auf ähnliche Weise eine Zeitlücke bestimmt. Die zugeordnete Geschwindigkeit stromaufwärts vom Probefahrzeug richtet sich hier nach dem Minimum der Geschwindigkeit des Probe-Fahrzeugs und dessen Geschwindigkeitsprofil. Die Generierung weiterer virtueller Fahrzeuge wird stromaufwärts in Richtung des EGO-Fahrzeugs generiert (bis der Anfang der Strecke erreicht wird).

Randbedingungen

[0136] Für verschiedene Anwendungen sind verschiedene Arten von Randbedingungen möglich. Beispielsweise kann die Strecke in einem Bereich von $x = 0$ bis $x = L$ betrachtet werden. Für eine Nachbildung des Verkehrs auf dieser Strecke wären im Prinzip die Daten an beiden Stellen 0 und L erforderlich, da auch die Fahrzeuge stromabwärts jenseits von $x = L$ das Verhalten der Fahrzeuge innerhalb der Strecke beeinflussen (z. B.: Stau).

[0137] Randbedingungen in Richtung stromaufwärts können wie folgt berücksichtigt werden: Der Teilchen-Gitter-Aufbau gestattet eine unmittelbare Darstellung der in die Strecke einfahrenden Fahrzeuge. Sie "betreten" das Gitter zu einem Zeitpunkt, der gemäß der Verkehrsnachfrage mit Hilfe eines Fahrzeuggenerators am Rand der Strecke bestimmt werden kann. Hierfür können Zeitlücken aus der Modellverteilung (modifizierte Exponentialverteilung) zufällig bestimmt werden. Nachdem die Fahrzeuge (Teilchen des Modells) die Position $x = 0$ passieren, bewegen sie sich gemäß den Modellgleichungen.

[0138] Randbedingungen in Richtung stromabwärts können wie folgt berücksichtigt werden: Für die Realisierung der Randbedingungen am Ende des simulierten Segments stromabwärts der simulierten Strecke ($x = L$) können Hilfsstrecken verwendet werden. Sie werden von dort gemäß sogenannter "freier Randbedingungen" fortgepflanzt, d. h., am Ende der simulierten Strecke bei $x = L$ wird die Bewegung mit Beschleunigung null (d. h. mit einer konstanten Geschwindigkeit) fortgesetzt.

Nutzung historischer Geschwindigkeitsprofile

[0139] Für die Simulation können auch historische Daten, z. B. in Form einer Verteilung bzw. eines Profils, genutzt werden. Beispielsweise können historische Daten in Abhängigkeit von Tag, Uhrzeit, Wetterbedingung, Jahreszeit, Feiertag oder allgemeinen Ereignissen (Fußball-Endspiel) gruppiert werden. Auch Kombinationen von den vorstehenden Kriterien können zur Gruppierung herangezogen werden. Weiterhin können historische Daten nach einem LIFO-Prinzip genutzt werden (die zuletzt erfassten Daten werden zuerst genutzt). Weiterhin könnten sehr alte Daten gelöscht werden. Auch können die historischen Daten selbst geeignet modelliert werden, so dass eine kompakte Wissensbasis durch die historischen Daten bereitgestellt werden kann. Ferner ist es möglich, dass unterschiedliche Daten gesammelt und als historische Daten für künftige Simulationen berücksichtigt werden.

[0140] Beispielsweise kann für jede Gitterzelle der Simulation zumindest ein Teil der folgenden Daten bereitgestellt werden:

- Eine historische Geschwindigkeit in der Gitterzelle.
- Ein boolescher Wert, der angibt, ob ein Verkehr in der Gitterzelle gebunden ist.
- Ein boolescher Wert, der angibt, ob es sich bei der Gitterzelle um ein stromabwärtiges Streckenende handelt.
- Ein boolescher Wert, der angibt, ob sich in der Gitterzelle ein Stau befindet.
- Eine Wartezeit in der Gitterzelle bei existierendem Stau
- Eine kumulierte Reisezeit bis zu der Gitterzelle.

[0141] Die Zuordnung von gebundenem bzw. ungebundenem Verkehr kann mittels einer Hysterese erfolgen: Falls stromabwärts ein kritischer Wert der Geschwindigkeit unterschritten wird, wird stromabwärts soweit gebundener Verkehrsfluss unterstellt, bis an einem Punkt ein zweiter (höherer) Wert der Geschwindigkeit überschritten wird. Der ungebundene Verkehr wird wiederum stromaufwärts fortgesetzt, bis der untere Wert wieder unterschritten wird. Auf diese Weise entsteht eine stabile Darstellung mit Hysterese.

[0142] Bei dem gebundenen Verkehr handelt es sich um einen Verkehr, bei dem der Fahrer bzw. das EGO-Fahrzeug nicht selbst die Geschwindigkeit frei wählen kann, sondern einem vorausfahrenden Fahrzeug folgt. Das EGO-Fahrzeug ist somit Teil einer gebundenen Kette aus Verkehrsteilnehmern.

Beschleunigungswunsch

[0143] Ein Beschleunigungswunsch des EGO-Fahrzeugs für eine Zeiteinheit (diskretes System basierende auf Zeiteinheiten als kleinste berücksichtigte Einheit) kann auf Basis der folgenden Werte berechnet werden:

x_c	Position des EGO-Fahrzeugs;
x_p	Position des vorausfahrenden Fahrzeugs;
d_{gap}	Entfernung zwischen EGO-Fahrzeug und vorausfahrendem Fahrzeug;
v_{carnow}	Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs;
v_{target}	Geschwindigkeit des Zielfahrzeugs (hier des vorausfahrenden Fahrzeugs).

[0144] Die Position bezieht sich hierbei vorzugsweise auf die Front des Fahrzeugs. Die Differenz d_{gap} zwischen den Fahrzeugen ergibt sich hierbei zu

$$d_{\text{gap}} = x_p - x_c.$$

[0145] Im Beschleunigungsmodell wird mit Hilfe der Werte d_{gap} , v_{carnow} , v_{target} und ggf. weiterer Parameter ein sogenannter Modus festgestellt:

- Ein Modus "ungültige Werte" wird bestimmt, falls die Geschwindigkeit negativ ist oder der Abstand null beträgt. Dies führt z. B. zu einem Abbruch bzw. zu einem Neustart der Simulation.
- Ein Modus "Panik" erfordert einen Eingriff des Fahrers (keine Regelung mehr möglich). Der Modus "Panik" tritt ein, wenn Mindestwerte für die Regelung unterschritten werden. Ggf. kann eine Notbremsung automatisch eingeleitet werden.
- Ein Modus "Gebunden: Anhalten" tritt ein, falls das vorausfahrende Fahrzeug bereits angehalten hat (z. B. an einer Ampel, etc.). In diesem Fall kann ein automatisiertes Anhalten (Abbremsen) mittels der Regelung veranlasst werden.
- Ein Modus "Gebunden: Fahrzeugfolgemodus" tritt ein, falls die Werte im Regelbereich sind. Der Regelalgorithmus kann entsprechend veranlassen, dass das EGO-Fahrzeug dem vorausfahrenden Fahrzeug folgt.

- Ein Modus "Gestoppt, Vordermann fährt los" tritt ein, wenn das EGO-Fahrzeug steht und der Vordermann die Fahrt aufgenommen hat. Der Regelalgorithmus kann veranlassen, dass sich das EGO-Fahrzeug dem Vordermann annähert.
- Ein Modus "Ungebunden" tritt ein, wenn die Zeitlücke mindestens zweimal der Gleichgewichtszeitlücke ist UND eine ausreichende Zeit bis zu einer möglichen Kollision (TTC-Wert) größer als eine minimale Zeit bis zu einer möglichen Kollision (z. B. in Höhe von 5 s) ist. In Folge kann mittels des Regelalgorithmus eine Relaxation in Richtung des Geschwindigkeitsprofils erfolgen, d. h. die in dem Geschwindigkeitsprofil hinterlegte Geschwindigkeit kann eingestellt werden. Entsprechend kann eine Beschleunigung erfolgen gemäß $tdif/tgrid$, wobei $vdif$ eine Differenzgeschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs zum Geschwindigkeitsprofil an der aktuellen Stelle und $tgrid$ eine Zeitdauer (z. B. 3 s) in der Gitterzelle angibt.
- Ein Modus "Ungebunden" (bei einer Option "freeflag") tritt dann ein, falls die Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug größer als eine vorgegebene Schranke (z. B. 6 s) ist UND eine ausreichende Zeit bis zu einer möglichen Kollision (TTC-Wert) größer als eine minimale Zeit bis zu einer möglichen Kollision (z. B. in Höhe von 5 s) ist. In diesem Fall kann die Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs auf die zulässige Geschwindigkeit geregelt werden.

Regelalgorithmus

[0146] In dem Fahrzeugfolgemodus wird angenommen, dass jedes EGO-Fahrzeug einen Gleichgewichtszustand anstrebt, der ggf. durch äußere Einflüsse nachgeregelt werden muss. Im Gleichgewicht hätte jedes EGO-Fahrzeug den gewünschten Abstand und die gleiche Geschwindigkeit wie das vorausfahrende Fahrzeug. Beispielfähig kann die Regelung gemäß einem gedämpften harmonischen Oszillator erfolgen mit einer Gleichgewichtszeitlücke (Länge des Fahrzeugs wird berücksichtigt), einer Federkonstante, und einer Dämpfung (unterkritisch bis kritisch).

[0147] Neben der Gleichgewichtszeitlücke kann jedem Fahrzeug eine Mindestzeitlücke zugeordnet werden, die den maximalen Ausschlag und die untere Grenze des Regelbereichs definiert. Die effektive Federkonstante ergibt sich aus der maximalen Komfortbeschleunigung bzw. dem maximalen Ausschlag.

[0148] Unvorhersehbare, plötzliche Ereignisse können dazu führen, dass sich die dynamischen Regelgrößen gelegentlich außerhalb des Regelbereichs befinden. In diesem Fall, etwa bei Unterschreitung der Mindestzeitlücke, kann ein Panik-Modell die Steuerung des Beschleunigungswunsches übernehmen. In dem Panik-Modell wird beispielsweise eine dem Fahrer zugeordnete maximale Bremsverzögerung angenommen.

Beschreibung der Simulationsläufe

[0149] Die Bewegungsgleichungen können schrittweise in vorgegebenen Zeiteinheiten (auch bezeichnet als Zeitscheiben δt , z. B. von 0,1 s) gelöst werden. Die neue Position errechnet sich aus der Geschwindigkeit multipliziert mit δt . Die neue Geschwindigkeit errechnet sich aus der Beschleunigungsvorgabe multipliziert mit δt . Die Beschleunigungsvorgabe gleicht normalerweise der Wunschbeschleunigung, wobei vorzugsweise sichergestellt wird, dass keine Grenzwerte unter- und/oder überschritten werden.

[0150] Die folgenden Ausnahmesituationen können gesondert behandelt werden:

- Das erste (stromabwärtige) Fahrzeug in der Simulation fährt mit konstanter Geschwindigkeit weiter, bis es die Endstrecke erreicht und das Gitter verlässt.
- Ein Probe-Fahrzeug erhält diejenige Trajektorie, die sich durch die von dem Probe-Fahrzeug übermittelten Daten ergibt (solange das Signal von dem Probe-Fahrzeug vorhanden ist). Liegt für das Probe-Fahrzeug kein C2C-Signal mehr vor, so wird es wie jedes andere virtuelle Fahrzeug simuliert.
- An der "Einfahrt" zur Strecke werden Fahrzeuge nach einem Nachfragemodell (bei einer vorgegebener Verkehrsstärke) erzeugt. Ihnen werden entsprechend dem historischen Profil anfängliche Geschwindigkeiten zugeordnet. Gleichzeitig wird darauf geachtet, dass kein Stau am Anfang der Strecke entsteht.

[0151] Die Simulation läuft so lange, bis alle Fahrzeuge des Fahrzeugspeichers die Strecke verlassen haben oder bis die maximale Simulationszeit (z. B. 300 Sekunden) überschritten wird.

[0152] Alle Trajektorien der simulierten Fahrzeuge (mit Zeitstempel) sowie die Identifikation des Probefahrzeugs werden vorzugsweise gespeichert.

Konzept für Ampelraten und Warteschlangen

[0153] Grundsätzlich ist es möglich, Warteschlangen ohne Geschwindigkeit, die im historischen Geschwindigkeitsprofil abgespeichert wurden, in der Simulation zu berücksichtigen.

[0154] Hierbei ist zu beachten, dass es unrealistisch ist, zu unterstellen, dass eine von einem einzelnen historischen Fahrzeug erlebte Warteschlange auch ständig von allen übrigen Fahrzeugen einer Simulation so erlebt wird. Dies würde früher oder später zu einem virtuellen Stillstand führen. Vielmehr ist es realitätsnah, aus der Gesamtheit der historischen Daten ein Modell für die zeitlichen Auftrittswahrscheinlichkeitsverteilungen aller potentiellen Ursachen von Warteschlangen (Ampel und Kreuzungen) z. B. in dem Backend zu entwickeln.

Prognose der Trajektorie: Gütefunktion

[0155] Um sowohl historische Profile als auch einzelne Trajektorien aus den Simulationsläufen zu bewerten, wird eine Gütefunktion verwendet. Hierzu kann ein Fehlermaß für die prognostizierte Reisezeit während der letzten X Meter (z. B. mit $X = 100$) bestimmt werden. Das Fehlermaß berechnet sich mit Hilfe des quadrierten Werts des Unterschieds prognostizierte Reisezeit minus erfasste Reisezeit, geteilt durch eine Schätzung der zu erwartenden Varianz dieser Größe. Die Güte ist dann (analog zur Gaußfunktion) ein exponentielles Fehlermaß bezogen auf diesen quadrierten Wert.

[0156] Beispielsweise kann eine Gütefunktion zur Ermittlung der zu erwartenden Varianz wie folgt bestimmt sein:

$$\sigma/\mu \approx 0.15 \cdot \left(\frac{480}{T}\right)^{1/2}.$$

[0157] Hierbei bezeichnen

T die Verkehrsgeschwindigkeit in einer Zelle (z. B. in Sekunden),
 σ die Standardabweichung und
 μ den Mittelwert,

wobei in diesem Fall $\mu = T$ gilt.

[0158] Optional kann als Fehlermaß auch ein Geschwindigkeitsunterschied (prognostiziert versus gemessen) geteilt durch die Varianz der Geschwindigkeit bestimmt werden.

Auswahl eines historischen Profils

[0159] Bereits vor einem Simulationslauf kann die bisherige Trajektorie des EGO-Fahrzeugs mit den vorhandenen historischen Profilen verglichen werden. Daraus kann jedem vorhandenen Profil ein Fitnesswert mit Hilfe der Gütefunktion zugeordnet werden.

[0160] Hierfür kann die Information "kumulierte Reisezeit bis zu der Gitterzelle" der historischen Daten verwendet werden. Historische Profile werden mit einer Wahrscheinlichkeit entsprechend ihrer Güte zufällig für die Simulation gewählt.

[0161] Falls gar kein historisches Profil geeignet ist, kann aus dem bisherigen Verlauf der Fahrt des EGO-Fahrzeugs ein Surrogat-Profil erzeugt werden, das im Wesentlichen die zulässige Geschwindigkeit als Profil verwendet.

Identifikation wahrscheinlicher EGO-Fahrzeug-Trajektorien

[0162] Anhand der Simulation können wahrscheinliche Trajektorien des EGO-Fahrzeugs bestimmt werden, indem sie gemäß ihrer Güte ("Fitness") gewichtet werden, wobei solche mit ausreichender Güte (bei Erreichen oder Überschreiten eines vorgegebenen Schwellenwerts) ausgewählt werden. Die Zeitreihen der Positionen, Geschwindigkeiten, und Beschleunigungen der Kandidaten können in einer Datenbank der "Prädiktionen" gespeichert werden. Jeder Prädiktion wird ein Gewicht gemäß der Güte zugeordnet, und die daraus resultierende Datenbank wird allen Anwendungen zur Verfügung gestellt.

[0163] Ein beispielhafter Algorithmus hat den folgenden Ablauf:

- (1) Synchronisierung der Simulation zum Zeitpunkt des letzten Signals von dem Probe-Fahrzeug (wegen Verzögerungen der Übertragung (Latenzen) ist dies nicht zwangsläufig der aktuelle Zeitpunkt).
- (2) Lokalisierung des EGO-Fahrzeugs (Zuordnung auf dem Simulationsgitter) zu diesem Zeitpunkt.
- (3) Lokalisierung der Position des dem EGO-Fahrzeug nächsten virtuellen Fahrzeugs und aller weiteren virtuellen Fahrzeuge des Simulationslaufs, die sich innerhalb einer vorgegebenen Toleranz zu dem EGO-Fahrzeug befinden.
- (4) Konstruktion der Zeitreihen:
 - a) Alle vorhandenen simulierten virtuellen Zeitpunkte werden in einen Puffer für die Prognosezeitreihe (synchronisiert mit dem EGO-Fahrzeug) geschrieben.
 - b) Falls die EGO-Fahrzeug-Trajektorie auch Zeitscheiben vor dem ersten Simulationszeitpunkt des jeweiligen virtuellen Fahrzeugs enthält, werden die fehlenden Werte der virtuellen Fahrzeuge mit dem für die Simulation verwendeten historischen Profil aufgefüllt.
 - c) Falls die simulierte Zeit nicht für den Prognosehorizont ausreicht, wird der virtuelle EGO-Fahrzeug-Kandidat verworfen.
- (5) Der Fitnesswert aller virtuellen EGO-Fahrzeug-Kandidaten wird bestimmt; derjenige EGO-Fahrzeug-Kandidat wird verworfen, dessen Fitness-Wert einen vorgegebenen Wert nicht erreicht.
- (6) Es erfolgt ein Abbruch bei einer Überschreitung einer vorgegebenen Rechenzeit oder bei Erreichung einer ausreichenden Zahl von geeigneten EGO-Fahrzeug-Kandidaten.
- (7) Für die geeigneten EGO-Fahrzeug-Kandidaten werden prognostizierte Verläufe in der Datenbank gespeichert.

[0164] Obwohl die Erfindung im Detail durch die Ausführungsbeispiele illustriert und erläutert wurde, ist die Erfindung nicht darauf beschränkt. Entsprechend können Variationen vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzzumfang der Erfindung zu verlassen.

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- http://de.wikipedia.org/wiki/Floating_Car_Data [0002]
- http://de.wikipedia.org/wiki/Sequenzielle_Monte-Carlo-Methode [0003]
- <http://de.wikipedia.org/wiki/VISSIM> [0112]

Patentansprüche

1. Verfahren zur Prognose einer Verkehrssituation für ein Fahrzeug,
 - bei dem anhand eines aktuellen Zustands des Fahrzeugs und anhand historischer Daten mindestens eine mögliche Zukunft für die Verkehrssituation des Fahrzeugs bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der aktuelle Zustand des Fahrzeugs mindestens einen der folgenden Parameter umfasst:
 - eine Position des Fahrzeugs;
 - eine Geschwindigkeit des Fahrzeugs;
 - eine zu fahrende Strecke;
 - eine Richtung;
 - ein Ziel.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die historischen Daten mindestens einen der folgenden Parameter umfassen:
 - eine Verkehrsdichte;
 - eine Durchschnittsgeschwindigkeit;
 - einen Geschwindigkeitsverlauf;
 - eine Reisezeit;
 - einen Verkehrszyklus, insbesondere einen Ampelzyklus;
 - eine Verkehrsstärke;
 - eine Verkehrslage.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die historischen Daten von unterschiedlichen Fahrzeugen aggregiert werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die historischen Daten an das Fahrzeug über eine mobile Kommunikationsschnittstelle übertragen werden.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die mindestens eine mögliche Zukunft des Fahrzeugs auch bestimmt wird anhand mindestens einer der folgenden Informationen:
 - eine Information von mindestens einem anderen Fahrzeug;
 - eine Information von einer Verkehrsinfrastruktur-Komponente;
 - eine Information von einer Verkehrszentrale;
 - eine Verkehrsinformation;
 - eine Information von einer digitalen Karte;
 - eine Information eines Fahrassistenzsystems;
 - Online-Daten.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die mindestens eine mögliche Zukunft des Fahrzeug auch mittels eines Zeitfensters bestimmt wird, wobei anhand des Zeitfensters der Zustand des Fahrzeugs für einen vorgegebenen vergangenen Zeitraum erfasst wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die mögliche Zukunft für die Verkehrssituation des Fahrzeugs mindestens eine der folgenden Möglichkeiten umfasst:
 - eine Position eines Stauendes;
 - ein künftiger Geschwindigkeitsverlauf;
 - ein künftiger Beschleunigungsverlauf;
 - eine Wartezeit und Staulänge vor einer Verkehrsanlage;
 - eine grüne Welle oder eine Geschwindigkeitsstrategie bei Annäherung an eine Verkehrsanlage;
 - eine Geschwindigkeitsempfehlung für sicheres oder effizientes Fahren.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die mindestens eine mögliche zukünftige Verkehrssituation für eine kurzfristige Zukunft des Fahrzeugs mittels einer Simulation bestimmt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem die Simulation mittels eines mikroskopischen Modells und/oder eines makroskopischen Modells für einen Verkehrsablauf durchgeführt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem das mikroskopische Modell Vorschriften zur Simulation einer Bewegung eines Fahrzeugs unter einer Berücksichtigung der Bewegungen der übrigen Fahrzeuge umfasst.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 oder 11, bei dem anhand des makroskopischen Modells der Verkehrsablauf als eine Art Flüssigkeit mit vorgegebenen Anfangsbedingungen und/oder Randbedingungen modelliert wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 12, bei dem anhand der Simulation ein zukünftiger Verkehrsfluss in Fahrtrichtung des Fahrzeugs bestimmt wird.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 13, bei dem im Rahmen der Simulation Daten von mindestens einem weiteren Fahrzeug auf ein virtuelles Fahrzeug abgebildet und entsprechend der historischen Daten sowie möglicher weiterer Daten virtuelle Fahrzeuge zur Abbildung eines entsprechenden Verkehrsflusses generiert und deren Auswirkungen auf das Fahrzeug bestimmt werden.

15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mehrere zukünftige Verkehrssituationen für das Fahrzeug bestimmt werden und diejenige Verkehrssituation ausgewählt wird, die mittels einer Gütefunktion als die am besten passende Verkehrssituation für das Fahrzeug ermittelt wird.

16. Verfahren nach Anspruch 15, bei dem basierend auf der am besten passenden Verkehrssituation eine vorgegebene Aktion ausgeführt wird.

17. Verfahren nach Anspruch 16, bei dem die vorgegebene Aktion mindestens eine der folgenden Möglichkeiten umfasst:

- eine optische Rückmeldung;
- eine haptische Rückmeldung;
- ein Eingriff in die Steuerung des Fahrzeugs;
- ein Herstellen einer Kommunikationsverbindung;
- ein Übermitteln einer Nachricht.

18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die mögliche Zukunft für die Verkehrssituation des Fahrzeugs eine Trajektorie und/oder einen Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeugs umfasst.

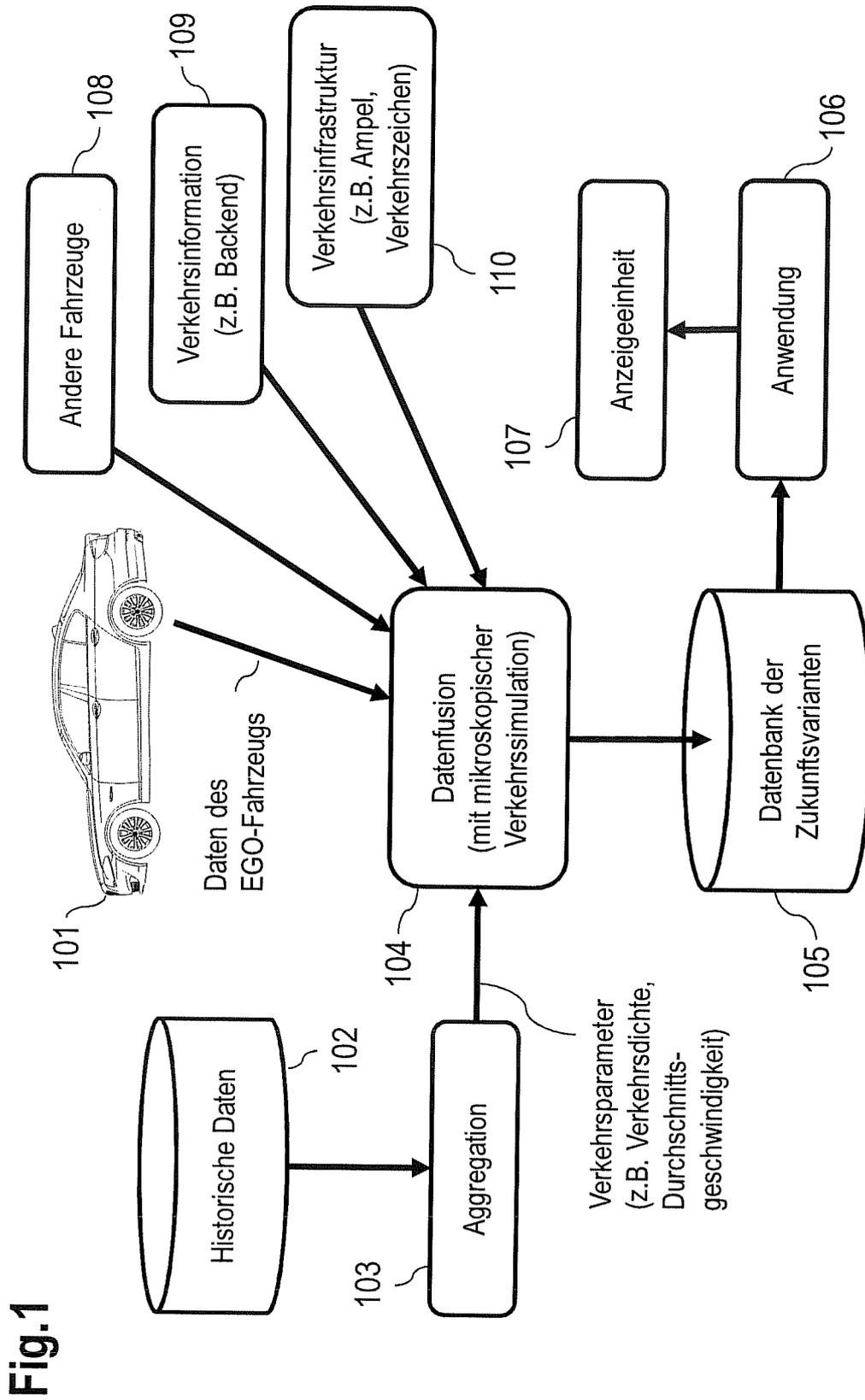
19. Vorrichtung zur Bereitstellung einer Prognose einer Verkehrssituation für ein Fahrzeug mit einer Verarbeitungseinheit, die derart eingerichtet ist, dass

- anhand eines aktuellen Zustands des Fahrzeugs und anhand historischer Daten mindestens eine mögliche Zukunft für die Verkehrssituation des Fahrzeugs ermittelbar ist.

20. Fahrzeug mit einer Vorrichtung gemäß Anspruch 19.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



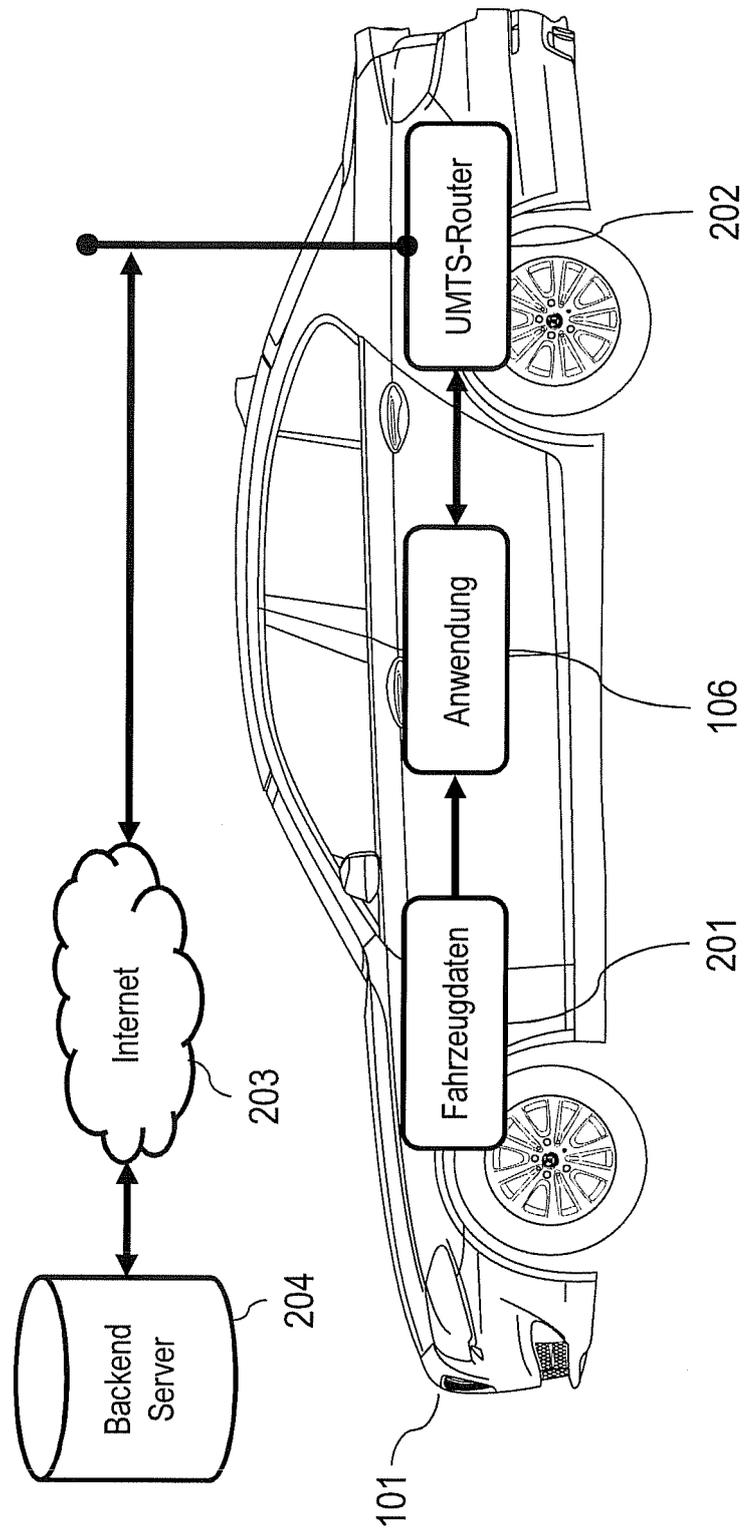


Fig.2