(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
20. Januar 2022 (20.01.2022)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2022/012826 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G08G 5/04 (2006.01) *G08G 7/02* (2006.01)
G08G 1/16 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2021/065775

(22) Internationales Anmeldedatum:
11. Juni 2021 (11.06.2021)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2020 208 779.2
14. Juli 2020 (14.07.2020) DE

(71) Anmelder: **VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT** [DE/DE]; Berliner Ring 2, 38440 Wolfsburg (DE).

(72) Erfinder: **HRUSCHKA, Clemens Markus**; Ackerstr. 62e, 38126 Braunschweig (DE).

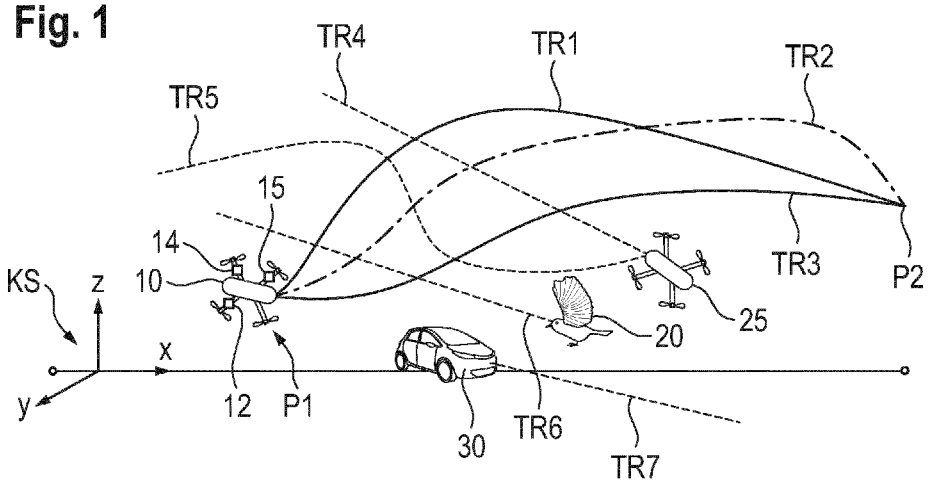
(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST,

(54) **Title:** METHOD AND DEVICE FOR DETERMINING A COLLISION PROBABILITY OF A VEHICLE WITH AN OBJECT IN A THREE-DIMENSIONAL SPACE

(54) **Bezeichnung:** VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM ERMITTELN EINER KOLLISIONSWAHRSCHEINLICHKEIT EINES FAHRZEUGS MIT EINEM OBJEKT IM DREIDIMENSIONALEN RAUM

Fig. 1



(57) **Abstract:** The invention relates to a method for determining a collision probability of a vehicle (10) with an object (20, 25). A three-dimensional position (x, y, z) and orientation of the vehicle (10) and the object (20) is detected. The vehicle (10) is approximated by at least one first geometrical element, wherein the at least one first geometrical element includes a part of the vehicle. The same is done for the object (20, 25). A first error (US1) and a second error (US2) is determined in relation to the geometrical element for the vehicle (10) or object (20, 25). A Minkowski difference (D') is formed for each combination of the at least one first geometrical element with the at least one second geometrical element. A third error (US3) is standardised by means of a transformation (TN). The transformation (TN) serves to calculate calculation elements (BK). The collision probability of the vehicle (10) with the object (20, 25) is determined on the basis a spatial union (D") of the calculation elements (BK)

WO 2022/012826 A1

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

(57) Zusammenfassung: Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln einer Kollisionswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs mit einem Objekt im dreidimensionalen Raum Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln einer Kollisionswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs (10) mit einem Objekt (20, 25). Eine dreidimensionalen Position (x, y, z) und Orientierung des Fahrzeugs (10) sowie des Objekts (20) wird erfasst. Das Fahrzeugs (10) wird durch mindestens einen ersten geometrischen Körper approximiert, wobei der mindestens eine erste geometrische Körper einen Teil des Fahrzeugs beinhaltet. Entsprechend wird mit dem Objekt (20, 25) verfahren. Eine erste Unschärfe (US1) und eine zweite Unschärfe (US2) wird bezüglich der geometrischen Körper für das Fahrzeug (10) oder Objekt (20, 25) ermittelt. Eine Minkowski-Differenz (D') wird für jede Kombination des mindestens einen ersten geometrischen Körpers mit dem mindestens einen zweiten geometrischen Körper gebildet. Eine dritte Unschärfe (US3) wird mittels einer Transformation (TN) standardisiert. Die Transformation (TN) dient zum Berechnen von Berechnungskörpern (BK). Basierend auf einer räumlichen Vereinigungsmenge (D") der Berechnungskörper (BK) wird die Kollisionswahrscheinlichkeit des Fahrzeugs (10) mit dem Objekt (20, 25) ermittelt.

Beschreibung

Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln einer Kollisionswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs mit einem Objekt im dreidimensionalen Raum

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln einer Kollisionswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs mit einem Objekt in einem dreidimensionalen Raum. Zudem betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Kollisionswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs mit einem Objekt in einem dreidimensionalen Raum. Zur Erfindung gehören ebenfalls ein Computerprogrammprodukt sowie ein computerlesbares Medium, auf dem das Computerprogrammprodukt abgespeichert ist.

Der Automobilsektor unterliegt derzeit einem Wandel. Dies betrifft nicht nur die Transformation einer Fahrzeugflotte vom Verbrennungsmotor hin zu einem Elektromotor, sondern ebenfalls die Transformation von einem reinen Automobilhersteller zu einem Mobilitätsdienstleister. Zukünftig wird ebenfalls eine Interaktion mit anderen Verkehrsobjekten eine immer größere Rolle spielen. Zu diesen anderen Verkehrsobjekten gehören insbesondere auch Luftfahrzeuge wie zum Beispiel Lufttaxis oder Drohnen. Bei derartigen Mobilitätsdienstleistungen müssen jedoch Landevorgänge oder Andockungen zwischen den Domänen (Straße und Luftraum) sicher gestaltet werden.

Bei einer automatisierten Flugtrajektorienplanung eines Luftfahrzeugs müssen in der Regel einzelne verfügbare Trajektorien bewertet werden und eine optimale Trajektorie ausgewählt werden. Dabei ist es insbesondere erwünscht, Kollisionen zu vermeiden. Mithilfe einer integrierten Sensorik werden beispielsweise Umgebungsinformationen erfasst oder mittels einer Car-to-X-Kommunikation wird mit anderen Objekten der Umgebung, zum Beispiel mit anderen Fahrzeugen, kommuniziert. Damit wird oft versucht, die Situation des eigenen oder anderen Fahrzeugs abzuschätzen und auf Basis dieser Informationen eine eigene Trajektorie zu planen.

Hierbei ist eine wesentliche Herausforderung, dass Wahrnehmungs- und Prädiktionsergebnisse aufgrund der sensorischen Erfassung des Umfelds und der unbekannten Intension anderer Verkehrsteilnehmer stets unsicherheitsbehaftet sind. Diese resultierenden Ortsunsicherheiten der Verkehrsteilnehmer können zwar grob abgeschätzt werden und zur Trajektorienplanung genutzt werden, jedoch erschwert dies die Trajektorienplanung deutlich. Dies kann dazu führen,

dass die Trajektorienplanung zu rechenintensiv wird und somit ein realistischer Flugbetrieb nicht mehr möglich wird. Schätzt man die Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund vereinfachender Annahmen ab, so resultiert daraus meistens eine deutliche Überschätzung der Kollisionswahrscheinlichkeit.

Die Offenlegungsschrift DE 10 2017 215 519 A1 beschreibt ein Verfahren und Vorrichtung zur Kollisionserkennung für ein Fahrzeug. Dabei wird ein zumindest dreistufiges Verfahren betrieben. Es können bis zu drei Kollisionsprüfungen ausgeführt werden. Dabei erfolgt eine stufenweise Betrachtung von Flächenbereichen entlang eines Abschnitts einer Bewegungsbahn des Fahrzeuges, wobei der Flächenbereich in den einzelnen Stufen an einen tatsächlichen Schweif des Fahrzeugs angenähert wird.

Die Offenlegungsschrift DE 10 2018 211 513 A1 betrifft eine Vorrichtung zum Bestimmen einer Kollisionswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs mit einem Objekt. Diese Vorrichtung beschränkt sich auf eine zweidimensionale Betrachtung und auf ein Schätzen der Kollisionswahrscheinlichkeit. Eine dreidimensionale Betrachtungsweise erfordert oft eine Sonderbehandlung der dritten Dimension, worauf diese Offenlegungsschrift nicht eingeht. So können gewisse Berechnungsschritte im zweidimensionalen nicht ohne Weiteres ins dreidimensionale übertragen werden.

Die Offenlegungsschrift DE 10 2009 045 755 A1 beschreibt ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Konflikterkennung. Dabei werden die Position, die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit des eigenen Luftfahrzeug sowie weiterer Luftfahrzeuge im Luftraum auf Grundlage von Sensordaten ermittelt. Daraus sollen jeweils die Trajektorien des eigenen Luftfahrzeugs sowie der fremden Luftfahrzeuge gebildet werden. Eine Schar von möglichen Trajektorien des eigenen Luftfahrzeugs wird auf Grundlage von möglichen Richtungsänderungen des eigenen Luftfahrzeugs berechnet. Die Schar der berechneten Trajektorien des eigenen Luftfahrzeugs wird daraufhin überprüft, ob jeweils ein Konflikt mit der Trajektorie eines fremden Luftfahrzeugs eintritt. Im Konfliktfall wird eine Information an den Führer des eigenen Luftfahrzeugs ausgegeben.

Bei einem Betrieb für Luftfahrzeuge ist es insbesondere erforderlich, die Trajektorienplanung sicher, aber auch schnell genug durchzuführen. Einen wichtigen Bestandteil der Trajektorienplanung bildet die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit des eigenen Luftfahrzeugs mit anderen Objekten.

Eine Aufgabe der Erfindung kann darin gesehen werden, eine Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit für Fahrzeuge im dreidimensionalen Raum effizienter auszugestalten. Insbesondere soll ein praktikabler Kompromiss zwischen Schnelligkeit bei der Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit und nicht zu starker Überschätzung der Kollisionswahrscheinlichkeit erreicht werden.

Die Bestimmung der Kollisionswahrscheinlichkeit von Trajektorien ist in der Regel sehr rechenintensiv, da oftmals keine geschlossenen oder analytischen Lösungen für dieses Problem vorliegen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn übliche Verfahren zum Objekttracking, wie zum Beispiel das Extended Kalman Filter, unsicherheitsbehaftete Objektzustände normal verteilt beschreiben. Verwandte Lösungsansätze sind zudem häufig nur auf den Straßenverkehr beschränkt oder können komplexe Realitäten nicht abbilden. Eine häufig verwendete Methode, um Kollisionswahrscheinlichkeiten zu berechnen, beruht auf dem sogenannten Monte-Carlo-Verfahren. Bei dieser Methode wird für eine hinreichende Genauigkeit eine hohe Anzahl von binären Kollisionsprüfungen benötigt, um letztendlich die Kollisionswahrscheinlichkeit anzunähern. Dies resultiert allerdings in einem sehr hohen Rechenzeitbedarf.

Ebenfalls sind numerische Integrationsverfahren bei einer Vielzahl von Diskretisierungsstellen, die für eine ausreichende Güte erforderlich sind, sehr rechenintensiv. Bereits bei dem Entwickeln autonom fahrender Kraftfahrzeuge, welche sich lediglich in einer Ebene bewegen (Autos im Straßenverkehr), zeigen sich erhebliche Schwierigkeiten. Derzeit ist es noch nicht möglich, ein vollautonomes Kraftfahrzeug bereitzustellen, welches auch komplexe Verkehrssituationen sicher und zuverlässig meisten kann. Bei Fahrzeugen, die im dreidimensionalen Raum operieren wie zum Beispiel Lufttaxis oder Drohnen, muss die gesamte Trajektorienplanung nicht nur in einer Ebene, sondern im dreidimensionalen Raum erfolgen. Sollen Luftfahrzeuge darüber hinaus auch vollautonom agieren können, ist entsprechend eine echtzeitfähige Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit von großer Bedeutung.

Aus diesen Gründen schlägt die Erfindung ein Verfahren zum Ermitteln einer Kollisionswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs mit einem Objekt in einem dreidimensionalen Raum vor. Ein erster Aspekt der Erfindung betrifft somit das Verfahren zum Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit. Das Fahrzeug kann insbesondere eine Drohne, ein Lufttaxi, ein Hubschrauber, ein Flugzeug und/oder ein Luftfahrzeug sein. Das Fahrzeug kann ein Kraftfahrzeug sein. Gemäß dem Verfahren soll eine Kollisionswahrscheinlichkeit mit einem Objekt ermittelt werden. Dieses Objekt kann beispielsweise ein anderes Fahrzeug, Luftfahrzeug, Kraftfahrzeug, ein Tier wie zum Beispiel ein Vogel, ein Baum, ein Gebäude, ein

halbstatisches Objekt wie zum Beispiel eine Windfahne oder eine sich im Wind drehende Windanzeige sein. Eine Windfahne kann häufig an Brücken angetroffen werden und ist meist an einem Mast statisch fixiert, wobei die Fahne selber beweglich ist. Da die Windfahne an sich aufgrund des Windes beweglich ist und dennoch aufgrund der Fixierung am Mast nicht ganz frei bewegbar ist, können solche Objekte als „halbstatisch“ bezeichnet werden.

Zunächst wird eine dreidimensionale Position und Orientierung des Fahrzeugs und des Objekts erfasst und/oder empfangen. Eine Erfassung der dreidimensionalen Position kann beispielsweise durch einen Sensor oder eine eigene Bordsensorik des Fahrzeugs erfolgen. Zusätzlich oder alternativ kann über eine Schnittstelle des Fahrzeugs eine Information zum Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit empfangen werden. Beispielsweise kann von einer externen Datenbank eine lokale Windgeschwindigkeit als Information empfangen werden. Es kann vorgesehen sein, dass die dreidimensionale Position und Orientierung des Fahrzeugs und des Objekts beispielsweise mittels einer am Fahrzeug angeordneten Sensoreinheit oder Umfeldsensorik beziehungsweise Bordsensorik erfasst werden. Diese Informationen zu der dreidimensionalen Position und Orientierung können an die Schnittstelle übermittelt werden. Diese Informationen können für das Ermitteln oder Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit berücksichtigt oder verwendet werden. Die dreidimensionale Position des Fahrzeugs und des Objekts kann insbesondere in kartesischen Koordinaten ausgedrückt werden. Allerdings kann die dreidimensionale Position ebenfalls in anderen Koordinaten wie zum Beispiel Kugelkoordinaten erfasst oder formuliert werden. Unter Umständen kann eine entsprechende Koordinatentransformation notwendig sein. Die Orientierung des Fahrzeugs und/oder des Objekts kann insbesondere eine dreidimensionale Orientierung sein. Dies bedeutet beispielsweise, dass mehrere Winkel zur Ausrichtung beziehungsweise Orientierung des Objekts und/oder Fahrzeugs vorliegen können. So kann eine Drohne beispielsweise eine Orientierung in einer xy-Ebene aufweisen, zugleich jedoch eine Orientierung in einer xz-Ebene und darüber hinaus eine eigene Orientierung in der zy-Ebene. Somit kann die dreidimensionale Orientierung drei Orientierungen umfassen. Dabei kann ein übliches kartesisches Koordinatensystem mit den bekannten Achsen x, y und z zugrunde gelegt werden. Die z-Achse weist dabei bevorzugt vertikal nach oben. Das Fahrzeug kann somit drei Freiheitsgrade für die Position aufweisen, beispielsweise in Form von drei kartesischen Koordinaten (x, y, z), und drei zusätzliche Freiheitsgrade für die Orientierung des Fahrzeugs, beispielsweise in Form dreier Winkel (Nickwinkel, Gierwinkel, Neigungswinkel). Somit kann das Fahrzeug sechs Freiheitsgrade aufweisen. Entsprechendes kann für das Objekt gelten. Die Anzahl der Orientierungen kann sich entlang einer Trajektorie ändern. Landet beispielsweise ein Fahrzeug und bewegt sich danach nur noch entlang einer Ebene (entlang des Bodens), so reicht in

diesem Fall nur noch eine einzige Orientierung. Die Anzahl der Orientierungen kann somit von dem Verlauf der Trajektorie abhängig sein.

In einem nächsten Schritt wird das Fahrzeug durch mindestens einen ersten geometrischen Körper approximiert. Das Approximieren des Fahrzeugs kann ein Repräsentieren, Annähern oder näherungsweises Darstellen des Fahrzeugs bedeuten. Der mindestens eine erste geometrische Körper kann somit das Fahrzeug repräsentieren, es annähern beziehungsweise es näherungsweise darstellen. Dabei beinhaltet der mindestens eine erste geometrische Körper einen Teil des Fahrzeugs. Dies bedeutet insbesondere, dass innerhalb des mindestens einen ersten geometrischen Körpers zumindest ein Teil des Fahrzeugs enthalten ist. Beim Approximieren kann die dreidimensionale Position und/oder Orientierung berücksichtigt werden. Das Fahrzeug kann beispielsweise mittels mehrerer erster geometrischer Körper approximiert werden. Es kann zum Beispiel mit zwei Kugeln als erste geometrische Körper approximiert werden. Das Approximieren wird bevorzugt analog bezüglich des Objekts durchgeführt. Dies bedeutet, dass das Objekt durch mindestens einen zweiten geometrischen Körper approximiert wird. Auch hier kann das Approximieren, Repräsentieren, Annähern oder Darstellen bedeuten, wie im Zusammenhang mit dem Fahrzeug erläutert wurde. Ebenso beinhaltet der mindestens eine zweite geometrische Körper einen Teil des Objekts. Das Fahrzeug und /oder das Objekt können mittels mehrerer geometrischer Körper approximiert werden, wobei die mehreren Körper eine Symmetrie aufweisen können.

Wird beispielsweise das Objekt durch drei Kugeln als zweite geometrische Körper approximiert, so sind innerhalb jeder dieser drei Kugel zumindest ein Teil des Objekts enthalten. Innerhalb dieser Kugeln kann das gesamte Objekt enthalten sein. Entsprechendes kann für das Fahrzeug gelten. Idealerweise kann für eine Vereinigungsmenge der ersten Körper eine Symmetrieachse definiert werden. Damit kann der Rechenaufwand reduziert werden. Entsprechendes kann für die zweiten Körper gelten. Vorzugsweise ist in dem mindestens einen ersten und/oder zweiten geometrischen Körper jener Teil des Fahrzeugs und/oder des Objekts enthalten, der ausgehend von einer a priori Abschätzung bei einer Kollision betroffen ist.

Das Fahrzeug kann insbesondere durch den mindestens einen ersten geometrischen Körper unterapproximiert werden. Unterapproximieren bedeutet insbesondere, dass der mindestens eine erste geometrische Körper das Fahrzeug nur teilweise, also bevorzugt nicht vollständig, beinhaltet. Somit kann das Approximieren ein Überapproximieren oder ein Unterapproximieren bedeuten. Beim Überapproximieren ist insbesondere das Fahrzeug vollständig in dem

mindestens einen ersten geometrischen Körper enthalten. Das Volumen des mindestens einen ersten geometrischen Körpers übersteigt in diesem Fall das Volumen des Fahrzeugs.

In einem weiteren Schritt werden eine erste Unschärfe des mindestens einen ersten geometrischen Körpers und eine zweite Unschärfe des mindestens einen zweiten geometrischen Körpers ermittelt und/oder vorgegeben. Dieser Schritt resultiert aus der Erkenntnis, dass sämtliche Messdaten von Sensoren und extern empfangene Informationen fehlerbehaftet sind und somit einer Ungenauigkeit oder einer Unsicherheit unterliegen. Unschärfe bedeutet in diesem Zusammenhang insbesondere eine Ungenauigkeit, eine Unbestimmtheit, Ungewissheit, Messfehler, Datenunsicherheit, Unsicherheit und/oder ein Toleranzbereich. Die erste und zweite Unschärfe bezieht sich insbesondere in erster Linie auf Sensordaten sowie extern empfangene Informationen. Die erste Unschärfe bezieht sich bevorzugt auf die Position und/oder Orientierung des mindestens ersten geometrischen Körpers. Somit kann die erste Unschärfe sich indirekt auf das Fahrzeug beziehen. Die erste Unschärfe kann sich aus einer Inertialunsicherheit des Fahrzeugs ergeben.

Bei mehreren ersten geometrischen Körpern kann jeder dieser ersten geometrischen Körper eine eigene erste Unschärfe aufweisen. Jeder geometrische Körper kann seine eigene Unschärfe aufweisen. Die mehreren Unschärfen können unterschiedlich sein, sie können jedoch gleich sein, um das Verfahren zu vereinfachen. Jeder geometrische Körper kann jeweils genau eine erste oder genau eine zweite Unschärfe aufweisen. Entsprechendes kann die für zweiten geometrischen Körper und/oder die zweiten Unschärfen gelten. Die zweite Unschärfe bezieht sich bevorzugt auf die Position und/oder Orientierung des mindestens einen zweiten geometrischen Körpers. Damit kann die zweite Unschärfe als (indirektes) Maß für die Unsicherheit der Position und/oder Orientierung des Objekts aufgefasst werden. Die erste Unschärfe bezüglich der Position des ersten geometrischen Körpers kann zum Beispiel in Form je eines Intervalls für jede Raumkoordinate ausgedrückt werden. Entsprechend können weitere Intervalle mit Winkelangaben die erste Unschärfe für die Orientierung des ersten geometrischen Körpers oder Fahrzeugs ausdrücken oder repräsentieren. Ausführungen zu der ersten Unschärfe können entsprechend für die zweite Unschärfe gelten.

Diese erste und zweite Unschärfen werden im weiteren Verlauf des Verfahrens bevorzugt berücksichtigt, um eine Transformation zu ermitteln, welche für die Ermittlung der Kollisionswahrscheinlichkeit nötig ist. Basierend auf einer Ungenauigkeit von Messdaten oder empfangenden Informationen kann insbesondere die erste und/oder zweite Unschärfe des mindestens einen ersten und/oder mindestens einen zweiten geometrischen Körpers ermittelt

werden. Somit kann sich eine Ungenauigkeit in den Sensordaten sowie den extern empfangenen Daten entsprechend auf die geometrischen Körper in Form der ersten und/oder zweiten Unschärfe übertragen.

Die Position der geometrischen Körper ist insbesondere nicht zu 100 Prozent eindeutig festgelegt oder definiert. Wird beispielsweise das Fahrzeug mittels einer Kugel approximiert, so kann diese Kugel aufgrund der Unschärfe je nach Ausmaß der Unschärfe entsprechend verschoben sein. Die räumliche Position dieser Kugel kann somit nicht exakt als Zahl, sondern nur als Intervall oder Bereich im Raum angegeben werden. Je größer dieses Intervall gewählt wird, umso sicherer kann darin die Kugel oder ein Teil von ihr verortet werden. Beim Ermitteln der ersten und/oder zweiten Unschärfe kann insbesondere das Berücksichtigen einer Gaußschen Normalverteilung vorgesehen sein. Kann die erste oder zweite Unschärfe beispielsweise nicht ermittelt werden, weil zum Beispiel eine Fehlerquelle nicht bekannt ist, so kann die erste oder zweite Unschärfe vorgegeben sein. Wird eine Sensorinformation beispielsweise anhand zweier Sensoren ermittelt, so kann eine entsprechende Fehlerfortpflanzung berücksichtigt werden. Hier kann insbesondere die bekannte Gaußsche Fehlerfortpflanzung bei mehreren Messfehlern zum Einsatz kommen.

In einem nächsten Schritt wird für jede Kombination des mindestens einen ersten geometrischen Körpers mit dem mindestens einen zweiten geometrischen Körper (je) eine Minkowski-Differenz gebildet. Der mindestens eine erste geometrische Körper repräsentiert bevorzugt das Fahrzeug. Der mindestens eine zweite geometrische Körper repräsentiert bevorzugt das Objekt. Dies kann zum Beispiel bedeuten, dass anstelle von Positionspunkten Intervalle bezüglich der Unschärfe für die Position des Fahrzeugs und/oder des Objekts für das Verfahren verwendet werden. Die Intervalle können Konfidenzintervalle oder Vertrauensintervalle sein. Über Unsicherheiten bezüglich des Fahrzeugs oder des Objekts kann auf die erste und/oder zweite Unschärfe des Fahrzeugs und/oder des Objekts geschlossen werden. Entsprechendes kann alternativ oder zusätzlich für die Orientierung gelten. Die Minkowski-Differenz ist insbesondere keine gewöhnliche Differenz, wie sie im Bereich der reellen Zahlen bekannt ist. Die Minkowski-Differenz kann insbesondere mittels folgender Formel beschrieben werden:

$$A \ominus B := \{a - b : a \in A, b \in B\} \qquad \text{Formel 1}$$

A und B sind jeweils eine Menge von Punkten. a und b sind jeweils Elemente der Mengen A und B. Bei dem Verfahren werden anstelle der Mengen A und B insbesondere jeweils die Punktmengen der jeweiligen geometrischen Körper verwendet.

Ein relativer Abstand zwischen zwei Körpern kann mittels der sogenannten Minkowski-Differenz bestimmt werden. Die Minkowski-Differenz ist insbesondere die Menge von Punkten, welche entsteht, wenn für jeden Punkt der Menge A die Differenzen mit den Punkten einer zweiten Menge B berechnet werden. Das Bilden der Minkowski-Differenz kann als eine Koordinatentransformation in relative Koordinaten angesehen werden, bei der ein relativer Abstand zum Ausdruck kommt.

Die Minkowski-Differenz kann ebenfalls als Minkowski-Summe aufgefasst werden. In diesem Fall wird die Subtraktion A-B als Summe der Mengen A und -B definiert. Die Minkowski-Differenz ist insbesondere hilfreich, um mögliche Kollisionen rasch zu erkennen. Jedoch ist zu bedenken, dass aufgrund der ersten und zweiten Unschärfe die Position der geometrischen Körper nicht exakt bestimmt ist. Damit weist die Minkowski-Differenz ebenfalls eine Unschärfe auf, welche als dritte Unschärfe bezeichnet wird. Die Minkowski-Differenz ist im Zweidimensionalen eine Fläche, in mehrdimensionalen Räumen ist die Minkowski-Differenz entsprechend ebenfalls mehrdimensional. Im dreidimensionalen Raum ist die Minkowski-Differenz daher insbesondere dreidimensional ausgebildet. Häufig wird jedoch aus Gründen der Vereinfachung die Minkowski-Differenz lediglich zweidimensional erläutert.

In einem weiteren Schritt wird eine jeweilige dritte Unschärfe für jede Minkowski-Differenz in Abhängigkeit von der jeweiligen ersten Unschärfe des mindestens einen ersten geometrischen Körpers und der jeweiligen zweiten Unschärfe des mindestens einen zweiten geometrischen Körpers ermittelt. Die dritte Unschärfe wird bevorzugt durch eine Addition der ersten Unschärfe und der zweiten Unschärfe bestimmt. Die dritte Unschärfe ist insbesondere eine Summe der ersten und zweiten Unschärfe. Bei mehreren ersten oder zweiten geometrischen Körpern resultieren insbesondere mehrere Minkowski-Differenzen. Zu jeder Minkowski-Differenz kann insbesondere jeweils genau ein erster und genau ein zweiter geometrischer Körper zugeordnet werden. Diese beiden geometrischen Körper können insbesondere genau eine erste Unschärfe und genau eine zweite Unschärfe aufweisen. Anhand dieser beiden Unschärfen wird bevorzugt die entsprechende dritte Unschärfe ermittelt oder bestimmt. Somit können bei mehreren Minkowski-Differenz entsprechend (gleich viele) mehrere dritte Unschärfen ermittelt werden. Jede dieser dritte Unschärfen bezieht sich dabei insbesondere auf die dazugehörige Minkowski-Differenz. Die dritte Unschärfe wird insbesondere im weiteren Verlauf des Verfahrens benötigt,

um eine Transformation oder Rechenoperation zum Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit zu bestimmen. Dadurch können bei der Ermittlung oder Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit im weiteren Verlauf des Verfahrens etablierte mathematische Methoden eingesetzt werden. Dies kann zu einer einfacheren und effizienteren Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit führen.

In einem weiteren Schritt wird die jeweilige dritte Unschärfe mittels einer jeweiligen Transformation standardisiert. Dabei wird insbesondere die jeweilige Transformation ermittelt oder bestimmt. Das Standardisieren der dritten Unschärfe führt im dreidimensionalen insbesondere zu einer Einheitskugel um den Ursprung. Dieselbe jeweilige Transformation wird auf die jeweilige gebildete Minkowski-Differenz angewandt, um jeweilige Berechnungskörper aus der jeweiligen Minkowski-Differenz zu ermitteln. Es können ebenso mehrere dritte Unschärfen standardisiert werden. Falls nur eine einzige Minkowski-Differenz vorliegt, wird entsprechend nur ein einziger Berechnungskörper ermittelt. Ein Standardisieren der dritten Unschärfe kann insbesondere bedeuten, dass eine zugehörige Kovarianzmatrix in eine Standardnormalverteilung überführt wird. Bei mehreren dritten Unschärfen können entsprechend mehrere Kovarianzmatrizen jeweils in eine Standardnormalverteilung transformiert oder überführt werden. So können mehrere dritte Unschärfen standardisiert werden. Die Transformation kann als Rechenoperation, Transformationsmatrix für den dreidimensionalen Raum verstanden werden. Die Transformation kann eine Dehnung, Translation, Stauchung, Verzerrung, Drehung und/oder Spiegelung umfassen. Die dazu jeweils nötige Transformation wird anschließend bevorzugt auf die jeweilige Minkowski-Differenz angewandt. Somit dient das Standardisieren insbesondere der Bestimmung der jeweiligen Transformation, die aus der Minkowski-Differenz den dazugehörigen Berechnungskörper ableitet. Je nach Ausprägung der Transformation kann dies zu einer Translation, Streckung, Verzerrung, Dehnung und/oder Stauchung der Minkowski-Differenzen führen.

Bei dem Prozess des Standardisierens kann insbesondere eine Normierung von Messwerten, ein arithmetisches Mittel, eine Standardabweichung und/oder eine Kovarianzmatrix berücksichtigt werden. Im zweidimensionalen kann das Standardisieren als entsprechende Modifikation eine Dichtefunktion der Normalverteilung betrachtet werden. Beim Standardisieren im zweidimensionalen wird die Dichtefunktion oder Dichtekurve insbesondere so gedehnt oder gestaucht, dass die Standardabweichung je nach Raumrichtung eins beträgt, wobei die Fläche der Dichtekurve (die Wahrscheinlichkeit) insgesamt konstant bleibt. Dieser Ansatz kann entsprechend bei mehrdimensionalen Verteilungen analog angewendet werden. Alternativ kann beim Standardisieren für die dritten oder weiteren Dimensionen zusätzlich ein jeweiliger

Skalierungsfaktor eingesetzt werden. Das Standardisieren einer Größe in einer Dimension kann als Verschieben sowie Dehnen und/oder Stauchen einer Normalverteilung angesehen werden. Bei einem Standardisieren in mehrdimensionalen Räumen (Dimension größer als zwei) kann für jede Dimension ein separater Skalierungsfaktor eingesetzt werden. So kann beispielsweise eine Verteilung mit einer bestimmten vorgegebenen Standardabweichung in eine andere Verteilung mit entsprechend anderer Standardabweichung überführt werden. Da hierbei insbesondere die unter der Dichtekurve repräsentierenden Wahrscheinlichkeiten bleiben sollen, werden die entsprechenden Dichtefunktionen entsprechend verschoben und/oder gedehnt. Wird im Folgenden von einem „Standardisieren der Minkowski-Differenz“ gesprochen, so ist damit bevorzugt das Standardisieren der jeweiligen dritten Unschärfe durch die entsprechende Transformation und Anwenden derselben Transformation auf die entsprechende Minkowski-Differenz gemeint.

Die Kollisionswahrscheinlichkeit des Fahrzeugs mit dem Objekt wird basierend auf einer Vereinigungsmenge der Berechnungskörper oder einer Näherung für die Vereinigungsmenge ermittelt. Die Kollisionswahrscheinlichkeit wird insbesondere in Abhängigkeit von der Vereinigungsmenge der Berechnungskörper oder einer Näherung für die Vereinigungsmenge ermittelt. Die Vereinigungsmenge ist insbesondere eine räumliche Vereinigungsmenge. Der Berechnungskörper kann insbesondere als ein Raumkörper wie zum Beispiel ein Ellipsoid, Quader, etc. ausgebildet sein. So können beispielsweise Kugeln durch die Transformation zu Ellipsoiden umtransformiert werden. Mehrere Minkowski-Differenzen können entsprechend durch die jeweiligen Transformationen, welche durch das Standardisieren der jeweiligen dritten Unschärfe ermittelt werden, zu mehreren neuen Berechnungskörpern transformiert werden. Die Minkowski-Differenz kann im dreidimensionalen Raum wie der Berechnungskörper als geometrischer Körper ausgebildet sein, wobei bevorzugt der Körper der Minkowski-Differenz sich von dem Körper des Berechnungskörpers unterscheidet. Durch die jeweilige Transformation werden insbesondere die Körper, die die Minkowski-Differenz repräsentieren, zu den neuen Berechnungskörpern transformiert oder umgeformt. Bei mehreren Minkowski-Differenzen können entsprechend mehrere Berechnungskörper hervorgehen. Somit kann sowohl die Minkowski-Differenz als auch der Berechnungskörper im Dreidimensionalen jeweils als Punktmengen im Raum oder als Körper aufgefasst werden. Bei höheren Dimensionen (n-dimensional; n größer als drei) kann dieser Ansatz entsprechend zu n-dimensionalen Körpern führen.

Die Berechnungskörper unterscheiden sich insbesondere von dem mindestens einen ersten und mindestens einen zweiten geometrischen Körper zum Approximieren. Die

Berechnungskörper können sich insbesondere teilweise überlappen beziehungsweise überschneiden. Das Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit kann insbesondere in Abhängigkeit von einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion erfolgen. Dazu kann insbesondere eine Integration beziehungsweise Summation der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion über die Vereinigungsmenge der Berechnungskörper erfolgen. In dem meisten Fällen kann keine analytische Integration durchgeführt werden. Daher wird bevorzugt eine Summation über die Vereinigungsmenge durchgeführt. Diese Summation kann anhand diskreter Punkte erfolgen. Die Vereinigungsmenge kann insbesondere als mathematischer Begriff verstanden werden. Sie repräsentiert demnach bevorzugt eine Gesamtheit der Volumina aller Körper der standardisierten Minkowski-Differenz, wobei sich überlappende Bereiche nur einmal gezählt werden. Wenn A und B als Mengen zu betrachten sind, dann ist die Vereinigungsmenge A vereinigt mit B jene Menge, in der gilt:

$$A \cup B = \{x | x \in A \ \vee x \in B\} \qquad \text{Formel 2}$$

Das Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit des Fahrzeugs kann insbesondere mittels einer Integration über das Raumgebiet der entsprechenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion oder Funktionen berechnet werden. Dazu kann beispielsweise folgende Formel verwendet werden:

$$P(C) = \int_D p_Z(z)dz \; mit \; D = \{z_E \in Z_E, z_T \in Z_T | \vartheta(z_E) \wedge \vartheta(z_T) \neq \emptyset\}$$

Formel 3

$p_Z(z)$ ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion inklusive der ersten und zweiten Unschärfe für die geometrischen Körper für das Fahrzeug und das Objekt; z_E ist ein Vektor des Fahrzeugs aus Z_E, der die erste Unschärfe des Fahrzeug-Vektors berücksichtigt; $\vartheta(z_E)$ repräsentiert eine Objektgrundvolumen des Fahrzeugs; $Z_T, \vartheta(z_T), \; z_T$ beziehen sich entsprechend das Objekt. $P(C)$ steht hier für die Kollisionswahrscheinlichkeit.

Diese allgemeine gehaltene Formel zur Integration oder Summation zum Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit kann in der Regel weiter vereinfacht werden. Dies führt zu folgender Formel:

$$P(C) = \int_D p_{Z_E}(z_E)\, p_{Z_T}(z_T)\, dz_E\, dz_T \qquad \text{Formel 4}$$

Formel 4 unterscheidet sich von Formel 3 darin, dass sowohl das Fahrzeug als auch für das Objekt eine eigene separate Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion verwendet wird. D in Formel 4 kann ein Volumen sein, welches zur Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit verwendet wird. D kann zum Beispiel das Volumen eines umschließenden Quaders, einer Kugel, eines Prismas etc. sein.

Die Schreibweise gemäß Formel 4 kann angewendet werden, wenn das Fahrzeug und das Objekt unabhängig voneinander agieren. Dies ist in aller Regel auch der Fall. Wenn sich beispielsweise eine Drohne im Luftraum bewegt, geschieht dies meist unabhängig von einem weiteren Objekt wie zum Beispiel einem Vogel. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen können als multivariate Normalverteilungen ausgebildet sein. Eine beispielhafte Normalverteilung für einen dreidimensionalen Raum ist mit folgender Formel angegeben:

$$p_Z(z) = \frac{1}{(2_\pi)^3 \det(\sum)} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot (z-\mu)^T \sum^{-1} (z-\mu)\right) \quad \text{Formel 5}$$

$\sum$ ist die Kovarianzmatrix; z ist in Formel 5 der jeweilige Ortsvektor für das Fahrzeug oder Objekt; μ der jeweilige Erwartungswert.

Eine derartige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion kann sowohl für das Fahrzeug als auch für das Objekt angenommen oder berechnet werden. Zum Berechnen von Formel 4 kann zunächst das Produkt der beiden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen gebildet werden und dann die Integration (numerisch) ausgeführt werden. Für die Integration über das Volumen kann das Volumen der räumliche Vereinigungsmenge oder ein anderes Volumen als Näherung dafür verwendet werden. So kann die Kollisionswahrscheinlichkeit des Fahrzeugs mit dem Objekt ermittelt oder berechnet werden.

Mit dieser Erfindung ist es möglich, die Kollisionswahrscheinlichkeit mit einem deutlichen Rechenzeitvorteil gegenüber einem Monte-Carlo-Verfahren sowie anderen numerischen Integrationsverfahren zu berechnen. Dabei kann der Verlust an Genauigkeit relativ gering gehalten werden und zugleich kann eine echtzeitfähige Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit ermöglicht werden. Insbesondere kann beispielsweise eine vollständige Trajektorie des Objekts oder des Fahrzeugs inklusive aller zu berechnenden Kollisionswahrscheinlichkeiten binnen 0,1 Sekunden erfolgen. Bevorzugt kann die Berechnung

der Kollisionswahrscheinlichkeit in Echtzeit erfolgen. Der Vorteil dieses Verfahrens baut sich im Vergleich zu dem Monte-Carlo-Verfahren aus, wenn für eine notwendige Güte bei den Monte-Carlo-Simulationen eine Vielzahl von Sampeln benötigt werden, da das vorgestellte Verfahren insbesondere eine abschätzbare, konstante Rechenlaufzeit benötigt. Mithilfe dieses Verfahrens kann auch in komplexen Systemen eine Echtzeitanforderung, in der viele verschiedene Trajektorien auf Kollisionen geprüft werden müssen, erreicht werden. Anstelle von binären Kollisionsprüfungen anderer Methoden kann stattdessen eine quantitative Kollisionswahrscheinlichkeit berechnet werden. Auftretende Unsicherheiten können in einem Entscheidungsprozess geeignet abgebildet werden. Insgesamt kann mit diesem Verfahren ein Rechenlaufzeitvorteil mit hoher Genauigkeit erzielt werden. Resultierende Ortsunsicherheiten von Verkehrsteilnehmern können mithilfe dieses Verfahrens in einer Kollisionswahrscheinlichkeit abgebildet werden und zur Trajektorienplanung genutzt werden. Damit kann das Risiko einer geplanten Trajektorie abgeschätzt und folglich entsprechend minimiert werden. So kann ein sicheres Manövrieren von Luftfahrzeugen im dreidimensionalen Raum erreicht werden.

Eine zusätzliche oder alternative Ausführungsform des Verfahrens kann vorsehen, dass ein Volumen der geometrischen Körper für das Fahrzeug und das Objekt in Abhängigkeit von einer digitalen Ressource bestimmt wird. Die digitale Ressource kann insbesondere eine verfügbare Rechenleistung sein. Zusätzlich oder alternativ kann das Volumen der Körper basierend auf einer Geschwindigkeit des Fahrzeugs und/oder des Objekts bestimmt werden. So kann beispielsweise bei einem Luftfahrzeug ein Körper gewählt werden, welcher an jener Stelle des Luftfahrzeugs angeordnet ist, welche in Flugrichtung hin orientiert ist. Bevorzugt enthält das Volumen des Körpers jenen Bereich des Fahrzeugs, der im Falle einer Kollision höchstwahrscheinlich betroffen sein würde. Somit kann das Volumen des Körpers sich bevorzugt auf eine potentielle Kollidierungsstelle des Fahrzeugs mit einem anderen Objekt beschränken. Damit kann auch bei relativ wenig verfügbarer Rechenleistung immer noch mit akzeptabler Genauigkeit ein Wert für die Kollisionswahrscheinlichkeit ermittelt werden. So ist es beispielsweise relativ unwahrscheinlich, dass eine Drohne im hinteren Bereich mit dem Objekt kollidiert.

Das Objekt sowie das Fahrzeug können jeweils kugelförmig approximiert werden. In diesem Fall ist der Körper jeweils als Kugel ausgebildet. Das Fahrzeug sowie das Objekt können durch mehrere Kugeln überapproximiert werden. Dabei enthalten die jeweiligen Volumina in ihrer Vereinigungsmenge jeweils das gesamte Fahrzeug beziehungsweise das gesamte Objekt. Im Falle einer Überapproximation durch mehrere Kugeln wird bevorzugt eine noch vertretbare

Vergrößerung des Volumens erzielt. Weitere Fahrzeuge in benachbarten Fahrbereichen oder Flugkorridoren können meist problemlos passieren. Eine Approximation mit kugelförmigen Körpern hat den Vorteil, dass die Orientierung jeweils vernachlässigt werden kann. Dies liegt vor allem an der besonderen Symmetrie der Kugel. Eine Drehung einer idealen Kugel führt zu derselben Kugel. Die Größe oder das Volumen der geometrischen Körper kann ebenfalls basierend auf einer Geschwindigkeit des Fahrzeugs oder des Objekts bestimmt werden. Tendenziell ist es sinnvoll, bei einer höheren Geschwindigkeit des Fahrzeugs ein größeres Volumen der Körper vorzusehen. Je nach Anwendungsfall und Sicherheitsanforderungen können auch Fahrzeuge mit relativ wenig Rechenleistung ebenfalls die Kollisionswahrscheinlichkeit ermitteln, um eine entsprechende Flugtrajektorie zu ermitteln. Dies könnte beispielsweise bei unkritischen Paketzustellungen der Fall sein.

Eine zusätzliche oder alternative Ausführungsform des Verfahrens sieht vor, dass der mindestens eine erste Körper das Fahrzeug vollständig beinhaltet und der mindestens eine zweite Körper das Objekt vollständig beinhaltet. Der mindestens eine erste Körper bezieht sich bevorzugt auf das Fahrzeug. Der mindestens eine zweite Körper bezieht sich auf das Objekt. Alternativ kann vorgesehen sein, dass der mindestens eine erste Körper das Fahrzeug unterapproximiert und der mindestens eine zweite Körper das Objekt unterapproximiert. Durch das Unterapproximieren wird insbesondere das vom Fahrzeug beziehungsweise vom Objekt jeweils repräsentierende Volumen kleiner als das Fahrzeugvolumen und/oder das Objektvolumen angenähert. Durch das Unterapproximieren wird insbesondere jeweils insbesondere der mindestens eine erste und/oder zweite geometrische Körper so gewählt oder ermittelt, dass dessen Volumina kleiner als die Volumina vom Fahrzeug beziehungsweise Objekt sind. Folglich wird beim Unterapproximieren die berechnete Kollisionswahrscheinlichkeit unterschätzt. Dies kann bevorzugt bei einer geringen Rechenleistung vorgesehen sein. In Abhängigkeit von einer verfügbaren digitalen Ressource oder Rechenleistung kann ein Überapproximieren oder Unterapproximieren vorgesehen sein.

Bei einer Überapproximation kann das Fahrzeug beispielsweise durch eine entsprechend große Kugel vollständig umschlossen werden. Ebenso können mehrere kleinere Kugeln insgesamt in ihrem Volumen das Fahrzeug vollständig beinhalten. Entsprechendes kann für das Objekt gelten. Anstelle von Kugeln können andere Körper wie Quader, Zylinder, Prismen, Pyramiden, Tetraeder, Kegeln, Oktaeder, etc. zum Approximieren verwendet werden. Diese Ausführungsform ist besonders dann sinnvoll, wenn Kollisionen möglichst ausgeschlossen werden sollen. In diesem Fall kann beispielsweise ermittelt werden, ob das Fahrzeug ein anderes Objekt nur streift, anstatt mit ihm zu kollidieren. Dieses Szenario kann dadurch

berücksichtigt werden. Beinhalten die mehreren ersten Körper das Fahrzeug komplett beziehungsweise vollständig, so kann mit der daraus berechneten Kollisionswahrscheinlichkeit jegliche Berührung des Fahrzeugs mit anderen Objekten ermittelt werden. Diese Ausführungsform ist zwar für sicherheitskritische Szenarien interessant, kann jedoch im Einzelfall verstärkte Anforderungen an die verfügbare Rechenleistung stellen.

Eine zusätzliche oder alternative Ausführungsform des Verfahrens sieht vor, dass die erste und/oder zweite Unschärfe basierend auf einer Gauß-Normalverteilung und/oder Fehlerfortpflanzung ermittelt werden. Die erste und/oder zweite Unschärfe resultiert insbesondere aus fehlerbehafteten Sensordaten, extern übermittelten Informationen, die ebenfalls fehlerbehaftet sind, und/oder aus einer jeweiligen Inertialunsicherheit des Fahrzeugs oder des Objekts. In den meisten Fällen kann für eine sinnvolle Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit eine Gauß-Normalverteilung der Messwerte um einen Erwartungswert angenommen werden. Registriert beispielsweise ein Temperatursensor einen Wert von 19,5 Grad Celsius, so könnte die entsprechende Gauß-Normalverteilung einen Toleranzbereich von 19,0 bis 20,0 Grad Celsius ergeben. Eine entsprechende Standardabweichung sowie ein vorzugebendes Vertrauensniveau können ebenfalls diesen Toleranzbereich beeinflussen. Je nach Anwendungsfall kann die Unschärfe, welche sich aus der Gauß-Normalverteilung ergibt, mit einem zusätzlichen Faktor skaliert werden. Die erste, zweite und/oder dritte Unschärfe kann als Intervall oder Toleranzbereich ausgedrückt werden. Insbesondere können so Intervalle für die räumliche Position und die Orientierung ermittelt werden. Bei kartesischen Raumkoordinaten kann für jede Raumkoordinate ein eigener Toleranzbereich ermittelt werden. Hängt beispielsweise eine Raumkoordinate wie zum Beispiel die geodätische Höhe z von mehreren Sensorwerten ab, so kann die Unschärfe für die geodätische Höhe z durch eine entsprechende Fehlerfortpflanzung ermittelt werden.

Die erste und zweite Unschärfe der ersten und zweiten geometrischen Körper kann insbesondere mittels einer Kovarianzmatrix mathematisch ausgedrückt werden. Bei einer Normalverteilung der Positionskoordinaten kann die jeweilige Unschärfe über die lineare Fehlerfortpflanzung nach Gauß ermittelt werden. Dabei wird insbesondere ausgehend von einer Unsicherheit des Fahrzeugs die erste Unschärfe des mindestens einen ersten geometrischen Körpers ermittelt. Entsprechend kann ausgehend von einer Unsicherheit des Objekts die zweite Unschärfe des mindestens einen zweiten geometrischen Körpers ermittelt werden. Die Formel 6 repräsentiert insbesondere eine Sensorunsicherheit oder Sensormessfehler. Die Formeln 7 bis 9 beziehen sich insbesondere auf Kugeln als Körper, die zum Approximieren verwendet werden. Dies kann beispielsweise mittels folgender Formel dargestellt werden:

$$Z_{E/T} \sim N\left(\mu_{E/T}^{6x1}, \sum_{E/T}^{6x6}\right); Z \sim N\left(\begin{pmatrix}\mu_E^{6x1}\\ \mu_T^{6x1}\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}\sum_E^{6x6} & * \\ * & \sum_T^{6x6}\end{pmatrix}\right) \quad \text{Formel 6}$$

$$Z_{c_{i/j}} = \begin{pmatrix} Z_{c_{i/j}x} \\ Z_{c_{i/j}y} \\ Z_{c_{i/j}z} \end{pmatrix}$$

$$= f_{i/j}(X_{E/T}, Y_{E/T}, Z_{E/T}, \mathrm{A}\,\alpha_{E/T}, \mathrm{B}\beta_{E/T}, \Gamma\gamma_{E/T}, \vartheta(\cdot))$$

$$= \begin{pmatrix} X_{E/T} \\ Y_{E/T} \\ Z_{E/T} \end{pmatrix} + R(\alpha, \beta, \gamma)\, distance \quad \text{Formel 7}$$

$$\mu_{c_{i/j}} = f_{i/j}(\mu_E) \quad \text{Formel 8}$$

$$\sum_{c_{i/j}} = \nabla f_{i/j} \sum_E \nabla f_{i/j}^T \quad \text{Formel 9}$$

Die Formeln 6 bis 9 beziehen sich insbesondere auf Kugeln als Körper, die zum Approximieren verwendet werden. In Formel 7 steht $distance$ für einen Abstand von Mittelpunkten jeweils zugehöriger Unschärfebereiche. $X_{E/T}, Y_{E/T}\ und\ Z_{E/T}$ repräsentieren insbesondere eine Raumpositionen des Fahrzeugs beziehungsweise des Objekts. $\mathrm{A}\,\alpha_{E/T}, \mathrm{B}\beta_{E/T}, \Gamma\gamma_{E/T}$ repräsentieren insbesondere eine Orientierung des Fahrzeugs beziehungsweise des Objekts im Raum. Ein Unschärfebereich kann in Form eines Ellipsoiden dargestellt werden. Formel 7 bezieht sich insbesondere auf den Fall, wenn das Fahrzeug oder Objekt zunächst mit einer einzigen Hauptkugel und anschließend mit mehreren Sub-Kugeln approximiert wird. $distance$ ist dann insbesondere der Abstand der Unschärfe der Hauptkugel zu je einer Unschärfe der jeweiligen Sub-Kugeln. Der Parameter $distance$ bezüglich mehrerer Sub-Kugeln kann symmetrisch gewählt werden, damit die erste Unschärfe zur jeder Sub-Kugel

gleich ausfällt und somit die Transformation zum Standardisieren der dritten Unschärfe beziehungsweise zum Umformen der Minkowski-Differenz in den Berechnungskörper nur einmal berechnet werden muss. Diese genannten Formeln gehen insbesondere von einer Normalverteilung der Positionskoordinaten aus und berücksichtigen eine lineare Unsicherheitsfortpflanzung nach Gauß. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Raumpose des Fahrzeugs beziehungsweise des Objekts bereits sechsdimensional ist, da neben den drei Raumkoordinaten $\begin{pmatrix} X_{E/T} \\ Y_{E/T} \\ Z_{E/T} \end{pmatrix}$ ebenfalls drei Orientierungskoordinaten α, β und γ angenommen werden. Entsprechendes gilt für die Raumkoordinaten des Objekts. Die Zufallsvektoren $Z_{c_{i/j}}$ sowie $\mu_{c_{i/j}}$ und $\sum_{c_{i/j}}$ können sich auf beliebige Körper beziehen.

$$z_E = \begin{pmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \\ \alpha_E \\ \beta_E \\ \gamma_E \end{pmatrix}; z_T = \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ \alpha_T \\ \beta_T \\ \gamma_T \end{pmatrix} \quad \text{Formel 10}$$

z_E und z_T repräsentieren die jeweiligen Ortsvektoren des Fahrzeugs beziehungsweise Objekts ohne Unsicherheit. Durch entsprechende Abbildungsvorschriften gemäß Formel 6 können die Vektoren z_E und z_T mithilfe der Zufallsvektoren Z_E und Z_T umgewandelt werden. Z_E und Z_T beinhalten insbesondere die Unsicherheit. Entsprechend kann die Unschärfe für die geometrischen Körper ermittelt werden. $R(\alpha, \beta, \gamma)$ beschreibt insbesondere eine Rotationsmatrix im mindestens dreidimensionalen Raum in Abhängigkeit von den Orientierungskoordinaten oder Winkeln α, β, γ.

Die beiden Vektoren z_E und z_T können zu einem gemeinsamen Vektor z zusammengefasst werden, der dann zwölfdimensional ist. z ist in diesem Fall ein zwölfdimensionaler Vektor und nicht die geodätische Höhe. In diesem Fall gilt:

$$z = (z_E^T \; z_T^T)^T \; mit \; z \in \mathbb{R}^{12} \quad \text{Formel 11}$$

In Bezug auf eine Sensordatenfunktion und Prädiktionsalgorithmen können die Zufallsvariablen als gemeinsam normalverteilt angenommen werden.

Die Kovarianzmatrizen für das Fahrzeug beziehungsweise für das Objekt beinhalten insbesondere die jeweiligen Unsicherheiten der zugrundeliegenden Sensoren oder Informationen. Die mit Stern gekennzeichneten Bereiche der Matrizen in Formel 6 sind für die weitere Berechnung nicht relevant, da sie sich nicht auf die Kollisionswahrscheinlichkeit auswirken.

Eine zusätzliche oder alternative Ausführungsform des Verfahrens sieht vor, dass mehrfach zu verschiedenen Zeitpunkten die dreidimensionale Position des Objekts und/oder die Orientierung erfasst werden zum Bestimmen einer dreidimensionalen Trajektorie des Objekts und in Abhängigkeit von der Trajektorie des Objekts eine von mehreren Trajektorien für das Fahrzeug ausgewählt wird, welche die geringste Kollisionswahrscheinlichkeit aufweist. Die Orientierung kann drei Freiheitsgrade in Form von drei Winkeln aufweisen. Aufgrund der Unsicherheit beziehungsweise Unschärfe der Position des Objekts oder aufgrund einer Unschärfe hinsichtlich des Verhaltens (Handlungshypothese) des Objekts können sich mehrere Trajektorien für das Objekt ergeben. Um zuverlässig eine Trajektorie des Objekts bestimmen zu können, wird in diesem Fall mehrfach zu verschiedenen Zeitpunkten die dreidimensionale Position und/oder Orientierung des Objekts erfasst. Ein zu erwartendes Objektverhalten kann zum Bestimmen der dreidimensionalen Trajektorie berücksichtigt werden. Eine Wahrscheinlichkeitsfunktion als Handlungshypothese könnte das Objektverhalten beschreiben. Dies könnte beispielsweise bei Vögeln zum Einsatz kommen. So kann beispielsweise aufgrund einer Objekterkennung oder Haltungsform eines Vogels ermittelt werden, ob dieser Vogel an einer Stelle verharrt, zu fliegen beginnt oder seine Flugbahn ändert. Solche unterschiedliche Verhaltensweisen können zusätzlich zu weiteren Trajektorien des Vogels führen. Eine entsprechende Analyse kann auch bei anderen Luftfahrzeugen oder Drohnen vorgenommen werden.

Insbesondere können mehrere Kollisionswahrscheinlichkeiten an mehreren Punkten zu einer einzigen Kollisionswahrscheinlichkeit für eine Trajektorie zusammengefasst werden. Mehrere Kollisionswahrscheinlichkeiten können somit zu einer (Gesamt-)Kollisionswahrscheinlichkeit für eine Trajektorie umgerechnet werden. Bevorzugt wird jene Trajektorie ausgewählt, welche die geringste Kollisionswahrscheinlichkeit aufweist. Dazu werden insbesondere Steuersignale erzeugt, welche ausgestaltet sind, eine entsprechende Aktorik des Fahrzeugs zu aktivieren, um das Fahrzeug entlang der Trajektorie mit der geringsten Kollisionswahrscheinlichkeit zu

manövrieren. Das Einschätzen der Verhaltensweise anderer Objekte kann mathematisch durch eine Handlungshypothese ausgedrückt werden. Die Handlungshypothese kann als Wahrscheinlichkeit aufgefasst werden, mit der eine bestimmte Handlung vorgenommen wird. Bei einem Vogel wäre dies zum Beispiel eine Wahrscheinlichkeit dafür, dass er wegfliegt oder nicht. Dies bedeutet, dass neben dem Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit zusätzlich weitere Wahrscheinlichkeiten hinsichtlich der Handlungshypothesen beim Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden können, um jene Trajektorie mit der geringsten Kollisionswahrscheinlichkeit zu identifizieren und/oder auszuwählen. Damit kann für das Fahrzeug die sicherste Flugtrajektorie ausgewählt werden.

Eine zusätzliche oder alternative Ausführungsform des Verfahrens sieht vor, dass für mehrere Punkte der Trajektorien für das Fahrzeug jeweils die Kollisionswahrscheinlichkeit ermittelt wird. Damit kann die Kollisionswahrscheinlichkeit nicht nur an einem möglichen Kollisionspunkt bestimmt werden, sondern entlang einer gesamten Trajektorie bestimmt werden. Ebenso kann eine (Gesamt-) Kollisionswahrscheinlichkeit für die gesamte Trajektorie aus mehreren Kollisionswahrscheinlichkeiten für die mehreren Punkte bestimmt werden. Bevorzugt werden die mehreren Punkte in jedem Bereich gewählt, der als potentielles Kollidierungsgebiet aufgefasst werden kann. So kann sichergestellt werden, dass die Kollisionswahrscheinlichkeit sich nicht nur auf einen einzelnen Punkt bezieht, sondern die Kollisionswahrscheinlichkeit eine Trajektorie für das Fahrzeug repräsentiert.

Eine zusätzliche oder alternative Ausführungsform des Verfahrens sieht vor, dass das Fahrzeug und das Objekt jeweils durch mindestens ein Polyeder approximiert werden und die Vereinigungsmenge der Berechnungskörper mittels eines Prismas approximiert wird, wobei das Prisma die Vereinigungsmenge vollständig enthält. Bevorzugt wird das Prisma anstelle der Vereinigungsmenge beim Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit berücksichtigt. Das Prisma stellt insbesondere eine Näherung an die Vereinigungsmenge dar. Das Prisma kann insbesondere gerade und regulär ausgebildet sein. Insbesondere kann das Prisma ein volumenminimales, die Vereinigungsmenge einschließendes gerades Prisma sein. Dies bedeutet insbesondere, dass das Prisma gerade groß genug ist, um die Vereinigungsmenge der Berechnungskörper vollständig einzuschließen beziehungsweise zu beinhalten. Beispielsweise kann ein Quader gewählt werden, dessen Abmessungen gerade ausreichen, um die Vereinigungsmenge der Berechnungskörper vollständig einzuschließen. Volumenminimal bedeutet in diesem Zusammenhang, dass insbesondere jenes Prisma gesucht oder gewählt wird, welches das geringstmögliche Volumen aufweist und dabei dennoch die Vereinigungsmenge der Berechnungskörper komplett oder vollständig beinhaltet.

Zum Berechnen oder Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit kann das Produkt der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (gemäß Formel 4) über das Raumvolumen der Vereinigungsmenge aufsummiert oder integriert werden. Alternativ kann eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion betreffend die dritte Unschärfe über das Volumen der Vereinigungsmenge der Berechnungskörper oder einer Näherung dafür aufsummiert oder (numerisch) aufintegriert werden. Bei mehreren dritten Unschärfen kann für jede dritte Unschärfe eine separate Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion definiert werden, ermittelt werden und/oder vorgegeben werden. Bei mehreren dritten Unschärfen können mehrere korrespondierende Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für das Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden. Bei dieser Ausführungsform des Verfahrens werden das Fahrzeug und das Objekt bevorzugt mittels entsprechender Polyeder approximiert. Bei einer Überapproximation beinhalten die jeweiligen Polyeder das Fahrzeug oder das Objekt vollständig.

Durch das Approximieren der Berechnungskörper mittels eines eingrenzenden geraden, idealerweise volumenminimalen, Prismas kann das Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit um eine Dimension reduziert werden. So kann es nur noch erforderlich sein, die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion lediglich über eine Fläche zu bestimmen. Aufgrund des geraden Prismas kann die dritte Dimension einfach berücksichtigt werden.

Bevorzugt sind alle Körper zum Approximieren konvex. Insbesondere sind alle Polyeder konvex. Ist keine Überschätzung der Kollisionswahrscheinlichkeit erforderlich, können beliebige konvexe Repräsentationen, also beliebige konvexe Polyeder für den mindestens einen ersten Körper und/oder den mindestens einen zweiten Körper gewählt werden. Bevorzugt ist eine Grundfläche zu einer Deckfläche des Prismas parallel. Dadurch kann ein leicht zu berechnendes Raumvolumen geschaffen werden. Zum Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit kann anstelle der räumlichen Vereinigungsmenge das Volumen des Prismas zum Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit herangezogen werden. Das Volumen des Prismas stellt insbesondere eine Näherung an die Vereinigungsmenge dar. Da das Volumen des Prismas die Vereinigungsmengen vollständig enthält, wird die Kollisionswahrscheinlichkeit nicht unterschätzt. Um die Kollisionswahrscheinlichkeit nicht unnötig zu überschätzen, ist es sinnvoll, das Prisma entsprechend volumenminimal zu wählen. Somit wird bevorzugt das Prisma anstelle der Vereinigungsmenge beim Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit berücksichtigt.

Alternativ kann eine bivariate Kollisionswahrscheinlichkeit für eine Grundfläche des Prismas bestimmt werden. Bei einem regulären geraden Prisma kann das Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit in eine zweidimensionale Komponente der Kollisionswahrscheinlichkeit und eine eindimensionale Komponente der Kollisionswahrscheinlichkeit zergliedert werden. Dies ermöglicht es insbesondere beide Kollisionswahrscheinlichkeiten getrennt voneinander zu ermitteln und anschließend zusammenzuführen. Bei der zweidimensionalen Komponente der Kollisionswahrscheinlichkeit wird die Kollisionswahrscheinlichkeit über eine entsprechende Gegenwahrscheinlichkeit ermittelt. Dies bedeutet, dass nicht eine Fläche innerhalb des Prismas, sondern eine Fläche außerhalb des Prismas berücksichtigt wird. Eine Grundfläche eines Prismas ist insbesondere ein Polygon. Der Außenbereich des Polygons kann durch entsprechende Verlängerung der Seitenkanten des Polygons in entsprechende Winkelsegmente aufgeteilt werden. Beim Berechnen der zweidimensionalen Komponente der Kollisionswahrscheinlichkeit kann insbesondere die Fläche außerhalb des Polygons berücksichtigt werden. Diese Flächen außerhalb des Polygons können durch die entsprechenden Winkelsegmente repräsentiert werden. Dabei kann die Eigenschaft der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion genutzt werden, dass diese mit zunehmendem Abstand immer geringer wird und zu Null abfällt. Dies lässt sich anschaulich dadurch erklären, dass bei immer größer werdendem Abstand die Kollisionswahrscheinlichkeit irgendwann Null beträgt.

Die eindimensionale Komponente der Kollisionswahrscheinlichkeit kann durch eine Multiplikation mit einer Höhe oder einer Differenz bezüglich einer kumulierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ermittelt werden, wobei die Differenz der kumulierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion an unterschiedlichen vertikalen Positionen definiert wird. In Formel 12 repräsentiert $1 - \sum P_i$ die zweidimensionale Komponente der Kollisionswahrscheinlichkeit, der Term $\left[cdf\left(\underset{z}{max}(P'')\right) - cdf(\underset{z}{min}(P''))\right]$ repräsentiert die eindimensionale Komponente der Kollisionswahrscheinlichkeit. So kann für jedes Winkelsegment um das Polygon herum die entsprechende Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion integriert oder aufsummiert werden. So kann ein Wahrscheinlichkeitswert ermittelt werden, der angibt, dass es zu keiner Kollision kommt. Die Kollisionswahrscheinlichkeit dagegen entspricht in diesem Fall genau dem Gegenereignis. Die dritte Komponente des dreidimensionalen Raumes kann mittels einer entsprechenden kumulierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion berücksichtigt werden. Dies führt zu folgender Formel:

$$P(C) = [1 - \sum P_i] \cdot \left[cdf\left(\underset{z}{max}(P'')\right) - cdf(\underset{z}{min}(P''))\right]$$

Formel 12

P_i: mit einem Winkelstück korrespondierende Wahrscheinlichkeit;

P'': Position innerhalb des Prismas;

$\left[cdf\left(\underset{z}{max}(P'')\right)\right]$: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ausgewertet an einer maximalen Position innerhalb in z-Richtung innerhalb des Prismas, beispielsweise an einer Deckfläche des Prismas. Die dritte Dimension z ist im Fall von Formel 12 stochastisch unabhängig. Der Index i gibt die jeweiligen Winkelsegmente um das Polygon des Prismas an.

Eine zusätzliche oder alternative Ausführungsform des Verfahrens sieht vor, dass die Berechnungskörper durch mehrere sich berührende Prismen approximiert werden. Die Prismen können insbesondere zueinander symmetrisch sein. Die mehreren Prismen können zueinander deckungsgleich sein. Sie können jedoch zueinander verschoben oder versetzt sein. In diesem Fall wird insbesondere zur Erhöhung der Genauigkeit die dritte Dimension, meist die Raumkoordinate z, diskretisiert. Mehrere sich einander berührende Prismen stellen dabei die Diskretisierung in Raumrichtung z dar. Dies bedeutet insbesondere, dass nach dem Bilden der Minkowski-Differenz nicht ein einzelnes gerades Prisma, sondern mehrere sich berührende gerade, idealerweise volumenminimale Prismen zur Einhüllung ermittelt oder ausgewählt werden. Damit können die Berechnungskörper engmaschiger in Abhängigkeit von den Diskretisierungsschritten umschlossen werden. Das Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit kann analog wie bei den zuvor beschriebenen Beispielen erfolgen. Da in der Regel für alle Prismen die gleiche Unsicherheitsverteilung zugrunde gelegt werden kann, kann dieselbe Transformation zum Bilden der Berechnungskörper und somit zum Ermitteln der jeweiligen Prismen verwendet werden. Das heißt, die für die Berechnungskörper erforderlicher Transformation muss idealerweise nur ein einziges Mal bestimmt werden.

Somit kann eine Überapproximation des Kollisionsgebietes durch die mehreren sich einander berührende Prismen vorgesehen sein oder durch eine Diskretisierung der 3. Dimension in mehrere Teilprismen kann die reale Kollisionswahrscheinlichkeit angenähert werden. Durch die Diskretisierung oder Diskretisierungsschritte kann insbesondere zwischen Rechenzeitbedarf und Genauigkeit variiert werden. Insbesondere kann eine Anzahl der sich berührenden

Prismen, also die Diskretisierung, in Abhängigkeit von einer digitalen Ressource wie zum Beispiel einer verfügbaren Rechenleistung bestimmt werden. Dadurch kann die Genauigkeit des Ermittelns der Kollisionswahrscheinlichkeit noch präziser erfolgen und zugleich Rechenzeit gespart werden.

Eine zusätzliche oder alternative Ausführungsform des Verfahrens sieht vor, dass das Fahrzeug und das Objekt jeweils durch mindestens eine Kugel approximiert werden und die Vereinigungsmenge der Berechnungskörper durch einen Quader approximiert wird, wobei der Quader die Vereinigungsmenge vollständig enthält. Bevorzugt wird der Quader anstelle der Vereinigungsmenge beim Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit berücksichtigt. Der Quader repräsentiert insbesondere eine Annäherung an die Vereinigungsmenge. Bei der Kugel handelt es sich bevorzugt um eine ideale geometrische Kugel. Das Fahrzeug beziehungsweise das Objekt können durch mehrere Kugeln approximiert werden. Bei dieser Ausführungsform des Verfahrens wird insbesondere geprüft, ob die mindestens eine Kugel für das Fahrzeug mit mindestens einer Kugel des Objekts überlappt, also kollidieren, könnte. Dazu reicht es insbesondere, wenn mindestens eine der Kugeln des Fahrzeugs sich mit einer der Kugeln des Objekts überlappt. Die Kollisionswahrscheinlichkeit ist somit kleiner als die Kollisionswahrscheinlichkeit aller möglichen Variationen an zu kollidierenden Kugeln des Fahrzeugs mit den Kugeln des Objekts. Dies kann mittels folgender Formeln ausgedrückt werden:

$$P(C) < P(C_{ms}) \qquad \text{Formel 13}$$

$$P(C_{ms}) = P(coll(c_1, c_3) \vee coll(c_1, c_4) \vee coll(c_1, c_5) \vee coll(c_2, c_3) \dots) \qquad \text{Formel 14}$$

$P(C_{ms})$ stellt die Kollisionswahrscheinlichkeit bezogen auf die mehreren Kugeln dar, welche die tatsächliche Kollisionswahrscheinlichkeit $P(C)$ überschätzt. Der Ausdruck coll(i,j) drückt dabei das Ereignis (hier die Kollision) aus, P(coll(i,j)) drückt die Wahrscheinlichkeit zu dem Ereignis, also die Kollisionswahrscheinlichkeit aus. Die unterschiedlichen Kollisionsereignisse sind in der Regel nicht voneinander unabhängig. Die Wahrscheinlichkeiten der Schnittmengen der Kugeln sind a priori nicht bekannt. Daher ist es in der Regel nicht praktikabel, die Ereignisse separat auszuwerten. Daher wird bevorzugt auch in diesem Fall für jede Kombination der ersten Unschärfen der Kugeln von dem Fahrzeug zu den zweiten Unschärfen von dem Objekt eine

jeweilige dritte Unschärfe gebildet und diese dritte Unschärfe im Anschluss standardisiert. Die dazu nötige Transformation wird insbesondere verwendet, um aus der jeweiligen Minkowski-Differenz den jeweiligen Berechnungskörper zu berechnen oder zu ermitteln. Das vereinigte Gebiet der Berechnungskörper bildet insbesondere die Berechnungsgrundlage für die gesuchte Kollisionswahrscheinlichkeit.

Die Unsicherheit oder Unschärfe der jeweiligen Kugeln kann ausgehend von der Fahrzeugunsicherheit bestimmt werden. Entsprechend der Normalverteilung erfolgt dies insbesondere über die lineare Unsicherheitsfortpflanzung nach Gauß. Dabei können die bereits erwähnten Formeln 6 bis 9 zum Einsatz kommen. Bei diesen mehreren Kugeln mit je eigener Unschärfe bezüglich der Koordinaten x, y und z lassen sich nun entsprechend viele Minkowski-Differenzen bilden. Aus einem Radius r_i der Kugeln des Fahrzeugs und Radius r_j der Kugeln des Objekts entstehen insbesondere jeweils Gebiete als Kugeln im Ursprung mit dem Radius $r = r_i + r_j$ sowie den Unsicherheiten $\Sigma i,j$. Die jeweiligen Minkowski-Differenzen sind im dreidimensionalen insbesondere jeweils Kugeln um den Ursprung. Da Kugeln in sich völlig symmetrisch sind, können Orientierungsinformationen vernachlässigt werden. Werden symmetrische Anordnungen der mehreren Kugeln gewählt, ähneln sich insbesondere die Transformationen für das Standardisieren der dritten Unschärfe oder das Ermitteln der Berechnungskörper und müssen entsprechend nur reduziert ausgerechnet werden.

Das Standardisieren der dritten Unschärfe führt insbesondere zu der Transformation, welche zum Ermitteln der Berechnungskörper dient. Die Vereinigungsmenge dieser Berechnungskörper kann genutzt werden, um die Kollisionswahrscheinlichkeit zu ermitteln. Jedoch kann der Rechenaufwand reduziert werden, indem ein achsenparalleler Polyeder, also ein Quader, um die Vereinigungsmenge als Näherung gezogen wird. Dabei sollte der Quader ähnlich wie bei dem Beispiel mit den Prismen volumenminimal ausgestaltet sein. Die Wahrscheinlichkeit, welche durch den Quader resultiert, überschätzt die Kollisionswahrscheinlichkeit abermals. Im Idealfall führt das Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung des Quaders nur zu einer geringfügigen Überschätzung der Kollisionswahrscheinlichkeit, hat aber einen deutlich geringeren Rechenaufwand zur Folge. Bei standardisierten Normalverteilungen sind alle Raumkoordinaten unabhängig voneinander. In diesem Fall können die Wahrscheinlichkeiten für die x-, y- und z-Koordinaten separat über die standardisierte Verteilungsfunktion ausgewertet werden. In diesem Fall wird die Verteilungsfunktion mit cdf bezeichnet und stellt eine kumulierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dar. Die Kollisionswahrscheinlichkeit bezogen auf den Quader kann mit folgender Formel ermittelt werden:

$$\tilde{P}(C_{BB}) = \left[cdf\left(\underset{x}{max}\left(D_V^{''}\right)\right) - cdf\left(\underset{x}{min}\left(D_V^{''}\right)\right)\right] \cdot \left[cdf\left(\underset{y}{max}\left(D_V^{''}\right)\right) - cdf\left(\underset{y}{min}\left(D_V^{''}\right)\right)\right] \cdot \left[cdf\left(\underset{z}{max}\left(D_V^{''}\right)\right) - cdf\left(\underset{z}{min}\left(D_V^{''}\right)\right)\right]$$ Formel 15

$D_V^{''}$ ist das Volumengebiet der Berechnungskörper. $\tilde{P}(C_{BB})$ ist die Kollisionswahrscheinlichkeit bezogen auf den Quader. cdf sind die jeweiligen kumulierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen.

Eine zusätzliche oder alternative Ausführungsform des Verfahrens sieht vor, dass ein Objekttyp des Objekts mittels einer Objekterkennung erfasst wird und in Abhängigkeit von dem Objekttyp die zweite Unschärfe für den mindestens einen zweiten Körper ermittelt wird. Die Objekterkennung kann beispielsweise mithilfe eines trainierten neuronalen Netzes erfolgen. Je nach Objekttyp kann eine unterschiedliche Unsicherheit für das Objekt und somit für den mindestens einen zweiten Körper resultieren. So weist beispielsweise eine Drohne als Objekt eine andere Unschärfe auf als ein Vogel. Bei einem Vogel kann dessen Verhalten viel schwieriger vorausgesagt werden als für eine gesteuerte Drohne. Beispielsweise kann eine andere Drohne ihre beabsichtigte Flugbahn beziehungsweise Trajektorie über eine entsprechende Schnittstelle (Car-to-X-Communication) bereitstellen. So kann das Fahrzeug bei einem Objekttyp Drohne davon ausgehen, dass bestimmte Verhaltensweisen wie zum Beispiel ein plötzliches Ausscheren sehr unwahrscheinlich sind. Bei einem Vogel hingegen ist zunächst nicht bekannt, wie sich der Vogel konkret in seiner Flugbahn verhalten wird. Diese unterschiedlichen Verhaltensweisen können mithilfe unterschiedlicher Handlungshypothesen mathematisch ausgedrückt werden. Diese unterschiedlichen Handlungshypothesen können, wie bereits erläutert, zu entsprechend unterschiedlichen Kollisionswahrscheinlichkeiten für die Trajektorien führen. Während bei einer Drohne beispielsweise es unwahrscheinlich ist, dass sie ihre geplante Trajektorie verlassen wird, kann dies bei einem Vogel nicht angenommen werden. So kann je nach Objekttyp das Ermitteln der zweiten Unschärfe dem Objekt entsprechend angepasst werden. Damit kann das Ermitteln oder Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit entlang einer Trajektorie noch realistischer ausgestaltet werden.

Eine zusätzliche oder alternative Ausführungsform des Verfahrens sieht vor, dass alle Körper zum Approximieren des Fahrzeugs und des Objekts konvex sind. Ein Körper ist insbesondere dann konvex, wenn bei allen Punktpaaren des konvexen Körpers die dazugehörige Verbindungsstrecke vollständig innerhalb des Körpers liegt. Damit kann das Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit zuverlässiger und einfacher ausgestaltet werden. Bei nicht-konvexen Körpern wie zum Beispiel einem Hohlzylinder oder einem Ring könnten entsprechende Algorithmen unrealistische Ergebnisse produzieren oder gar zum Absturz des Algorithmus führen. Dies ist zwar nicht zwingend der Fall, jedoch hat sich gezeigt, dass zum Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit durch das Verwenden von konvexen Körpern zum Approximieren des Fahrzeugs und/oder des Objekts eine besonders hohe Zuverlässigkeit erreicht werden kann.

Eine zusätzliche oder alternative Ausführungsform des Verfahrens sieht vor, dass in Abhängigkeit von der ermittelten Kollisionswahrscheinlichkeit ein Steuersignal zum Manövrieren des Fahrzeugs erzeugt wird und/oder ein Hinweissignal für einen Führer des Fahrzeugs ausgegeben wird. Entsprechend kann ein Steuersignal für eine ermittelte Trajektorie mit geringer Kollisionswahrscheinlichkeit erzeugt werden. Alternativ oder zusätzlich kann die ermittelte Kollisionswahrscheinlichkeit für eine Regelung des Fahrzeugs verwendet werden. Dabei kann in Abhängigkeit von der ermittelten Kollisionswahrscheinlichkeit die Trajektorie des Fahrzeugs angepasst werden. Ein Steuersignal zum Manövrieren des Fahrzeugs wird bevorzugt für autonome Fahrzeuge erzeugt. Dies ist beispielsweise bei Drohnen der Fall. Ist das Fahrzeug dagegen zum Beispiel ein Lufttaxi, welches einen Fahrzeugführer benötigt, so kann es ausreichend sein, anstelle eines Steuersignals ein Hinweissignal für den Fahrzeugführer auszugeben. Dieser kann basierend auf das Hinweissignal das Fahrzeug entsprechend so steuern, dass es zu keiner Kollision kommt. Im Falle des autonom fliegenden Fahrzeugs ist das Steuersignal insbesondere ausgestaltet, eine entsprechende Aktorik des Fahrzeugs anzusteuern und zu beeinflussen, sodass eine Kollision sicher vermieden wird. Bei einer Steuerung des Fahrzeugs durch einen Piloten kann ein Auslösen einer Sicherheitsfunktion ausreichend sein. In Abhängigkeit von einer Höhe der Kollisionswahrscheinlichkeit kann zusätzlich vorgesehen sein, dass eine temporäre automatische Steuerung, ähnlich wie bei einem Notbremsassistenten bei Autos, erfolgt.

Ein zweiter Aspekt der Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Ermitteln einer Kollisionswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs mit einem Objekt in einem dreidimensionalen Raum. Der dreidimensionale Raum ist insbesondere ein Verkehrsraum, der für Luftfahrzeuge

freigegeben ist. Die Vorrichtung weist mindestens eine Sensoreinheit zum Erfassen einer dreidimensionalen Position und einer Orientierung des Fahrzeugs und des Objekts auf. Zusätzlich oder alternativ weist die Vorrichtung eine Schnittstelle zum Empfangen von Informationen bezüglich der dreidimensionalen Position und Orientierung des Fahrzeugs und des Objekts auf. Die Vorrichtung weist ferner eine Steuereinheit auf. Diese Steuereinheit ist eingerichtet, das Fahrzeug durch mindestens einen ersten geometrischen Körper zu approximieren, wobei der mindestens eine erste geometrische Körper einen Teil des Fahrzeugs beinhaltet. Das Fahrzeug kann insbesondere durch den mindestens einen ersten geometrischen Körper unterapproximiert sein. Unterapproximieren bedeutet insbesondere, dass der mindestens eine erste geometrische Körper das Fahrzeug nur teilweise, also bevorzugt nicht vollständig, beinhaltet. Somit kann das Approximieren ein Überapproximieren oder ein Unterapproximieren bedeuten. Beim Überapproximieren ist insbesondere das Fahrzeug vollständig in dem mindestens einen ersten geometrischen Körper enthalten. Das Volumen des mindestens einen ersten geometrischen Körpers übersteigt in diesem Fall das Volumen des Fahrzeugs. Das Volumen des mindestens einen ersten geometrischen Körpers ist also größer als das Volumen des Fahrzeugs.

Die Steuereinheit ist zudem eingerichtet, das Objekt durch mindestens einen zweiten geometrischen Körper zu approximieren, wobei der mindestens eine zweite geometrische Körper einen Teil des Objekts beinhaltet. Die Ausführungen bezüglich des Approximierens, der Unterapproximation und/oder der Überapproximation hinsichtlich des Fahrzeugs können analog auf das Approximieren des Objekts übertragen werden. Das Objekt kann durch den mindestens einen zweiten geometrischen Körper überapproximiert oder unterapproximiert werden. Beim Approximieren kann jeweils die Position und/oder Orientierung des Fahrzeugs oder des Objekts einfließen.

Die Steuereinheit ist imstande, eine erste Unschärfe des mindestens einen ersten geometrischen Körpers und eine zweite Unschärfe des mindestens einen zweiten geometrischen Körpers zu ermitteln und/oder vorzugeben. Die Steuereinheit ist eingerichtet, eine Minkowski-Differenz für jede Kombination des mindestens einen ersten geometrischen Körpers für das Fahrzeug mit dem mindestens einen zweiten geometrischen Körper für das Objekt zu bilden. Die Steuereinheit ist ferner ausgebildet, eine jeweilige dritte Unschärfe für jede Minkowski-Differenz in Abhängigkeit von der ersten Unschärfe des mindestens einen ersten geometrischen Körpers und der zweiten Unschärfe des mindestens einen zweiten geometrischen Körpers zu ermitteln. Die Steuereinheit ist eingerichtet, die jeweilige dritte Unschärfe mittels einer jeweiligen Transformation zu standardisieren und dieselbe jeweilige

Transformation auf die jeweils gebildete Minkowski-Differenz anzuwenden, um jeweilige Berechnungskörper aus der Minkowski-Differenz zu ermitteln. Ferner ist die Steuereinheit eingerichtet, die Kollisionswahrscheinlichkeit des Fahrzeugs mit dem Objekt basierend auf einer Vereinigungsmenge der Berechnungskörper oder einer Näherung für die Vereinigungsmenge zu ermitteln oder zu berechnen.

Die Sensoreinheit kann mehrere Sensoren umfassen. Die Sensoreinheit kann somit einen Temperatursensor, eine Kamera, einen Lidarsensor, einen Drucksensor, Ultraschallsensor und/oder Radarsensor aufweisen. Mithilfe der Schnittstelle können beispielsweise Vektordaten von einer externen Datenquelle empfangen werden. Ebenso können Informationen von anderen Fahrzeugen oder Flugobjekten über die Schnittstelle empfangen werden. Die Vorrichtung kann ein neuronales Netz aufweisen, welches eine Objekterkennung ermöglicht. Dazu können beispielsweise entsprechende Kamerabilder mithilfe des neuronalen Netzes ausgewertet werden.

Weiterbildungen und Ausführungen zu dem ersten Aspekt können sinngemäß und analog auf den zweiten Aspekt übertragen werden sowie umgekehrt. Somit können sämtliche Verfahrensmerkmale als gegenständliche Vorrichtungsmerkmale interpretiert werden. Dies gilt entsprechend auch umgekehrt.

Die Steuereinheit kann insbesondere einen Computer, einen Mikrocontroller, einen integrierten Schaltkreis oder ein neuronales Netz umfassen. Alternativ kann die Steuereinheit einen realen oder virtuellen Verbund von Computern umfassen. Die Steuereinheit kann ferner als ein Prozessor oder Mikrochip ausgebildet sein. So kann die Steuereinheit Hardware-Elemente oder Software-Elemente aufweisen, um das erläuterte Verfahren sowie dessen Weiterbildungen auszuführen. Dazu kann die Steuereinheit zusätzlich auf eine Speichereinheit zugreifen. Die Speichereinheit kann als dauerhafter Speicher oder als nicht dauerhafter Arbeitsspeicher ausgebildet sein. Die Steuereinheit kann somit eine Prozessoreinrichtung aufweisen, die dazu eingerichtet ist, sämtliche Ausführungsformen des Verfahrens auszuführen. Die Prozessoreinrichtung kann dazu zumindest einen Prozessor und/oder zumindest einen Mikrocontroller und/oder zumindest einen FPGA (Field Programmable Gate Array) und/oder zumindest einen DSP (Digital Signal Processor) aufweisen. Des Weiteren kann die Prozessoreinrichtung einen Programmcode aufweisen, der dazu eingerichtet ist, bei Ausführen durch die Prozessoreinrichtung die Ausführungsform des Verfahrens durchzuführen. Der Programmcode kann in einem Datenspeicher der Prozessoreinrichtung gespeichert sein.

Die Sensoreinheit kann insbesondere als ein Umfeldsensorsystem ausgebildet sein. Das Umfeldsensorsystem ist insbesondere in der Lage, Sensordaten oder Sensorsignale zu erzeugen, welche eine Umgebung des Fahrzeugs abbilden, darstellen oder wiedergeben.

Zu der Erfindung gehört auch ein Computerprogrammprodukt, welches Befehle umfasst, die bewirken, dass die Vorrichtung die Verfahrensschritte ausführt. Das Computerprogrammprodukt kann in Form eines Programmcodes vorliegen. In diesem Programmcode können entsprechende Befehle hinterlegt sein, die bei entsprechender Ausführung die Verfahrensschritte des Anspruchs 1 sowie aller weiteren Weiterbildungen des Verfahrens ausführen können.

Ebenso gehört zur Erfindung ein computerlesbares Medium, auf dem das Computerprogrammprodukt gespeichert ist. Insbesondere beinhaltet das computerlesbare Medium den Programmcode mit den entsprechenden Befehlen, welche in der Lage sind, das Verfahren nach Anspruch 1 auszuführen. Das computerlesbare Medium kann eine Speicherkarte, eine Festplatte sowie ein sonstiger nicht-flüchtiger Speicher sein.

Zu der Erfindung gehören auch Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens, die Merkmale aufweisen, wie sie bereits im Zusammenhang mit den Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Kraftfahrzeugs beschrieben worden sind. Aus diesem Grund sind die entsprechenden Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens hier nicht noch einmal beschrieben.

Die Erfindung umfasst auch die Kombinationen der Merkmale der beschriebenen Ausführungsformen.

Im Folgenden ist sind mehrere Ausführungsbeispiele der Erfindung beschrieben. Hierzu zeigt:

Fig. 1 eine beispielhafte Darstellung eines Fahrzeugs mit mehreren Objekten im dreidimensionalen Raum sowie mehrere mögliche Trajektorien für das Fahrzeug;

Fig. 2 ein beispielhaftes Ablaufdiagramm für ein mögliches Verfahren der Erfindung;

Fig. 3 eine beispielhafte Darstellung eines Verfahrens, bei dem die Approximation des Fahrzeugs und des Objekts mittels mehrerer Kugeln erfolgt;

Fig. 4 eine beispielhafte Darstellung einer Approximation des Fahrzeugs und des Objekts mittels Polyeder;

Fig. 5 eine beispielhafte zweidimensionale Darstellung zum Bilden der Minkowski-Differenz sowie zum Standardisieren einer dritten Unschärfe und zum Bilden eines Berechnungskörpers;

Fig. 6 eine beispielhafte Darstellung für das Approximieren der Berechnungskörper mittels eines oder mehrerer gerader Prismen.

Bei dem im Folgenden erläuterten Ausführungsbeispiel handelt es sich um eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung. Bei dem Ausführungsbeispiel stellen die beschriebenen Komponenten der Ausführungsform jeweils einzelne, unabhängig voneinander zu betrachtende Merkmale der Erfindung dar, welche die Erfindung jeweils auch unabhängig voneinander weiterbilden und damit auch einzeln oder in einer anderen als der gezeigten Kombination als Bestandteil der Erfindung anzusehen sind. Des Weiteren ist die beschriebene Ausführungsform auch durch weitere der bereits beschriebenen Merkmale der Erfindung ergänzbar. In den Figuren sind funktionsgleiche Elemente jeweils mit denselben Bezugszeichen versehen.

Fig. 1 zeigt beispielhaft eine mögliche Verkehrssituation für ein Fahrzeug 10. In Fig. 1 sind neben dem Fahrzeug 10 zwei Objekte 20 und 25 sowie ein Auto 30 abgebildet. Das Objekt 25 ist wie das Fahrzeug 10 ebenfalls ein Luftfahrzeug. In diesem Beispiel sind die Luftfahrzeuge jeweils als Drohnen ausgebildet. Das Objekt 20 ist ein Vogel. Fig. 1 zeigt sieben mögliche Trajektorien TR1 bis TR7. Die siebte Trajektorie TR7 zeigt an, in welche Richtung das Auto 30 fahren wird. Da das Auto 30 kein Luftfahrzeug ist, befindet sich dessen siebte Trajektorie TR7 in der xy-Ebene. Fig. 1 zeigt dazu ein kartesisches Koordinatensystem KS mit den üblichen Achsen x, y und z. Der Vogel 20 besitzt die sechste Trajektorie TR6, die weitere Drohne als Objekt 25 kann zwei mögliche Trajektorien, die vierte und fünfte Trajektorie TR4 und TR5 benutzen. Das Fahrzeug 10 weist eine Sensoreinheit 12, eine Schnittstelle 15 sowie eine Steuereinheit 14 auf. Mehrere Sensoren können die Sensoreinheit 12 bilden. Dies können beispielsweise eine Kamera, ein Lidarsensor, ein Radarsensor, ein Ultraschallsensor, ein Drucksensor, ein Temperatursensor, ein Strahlungssensor, ein Venturi-Rohr, ein Pitot-Rohr oder weitere Sensoren zur Umfelderfassung sein. Die Steuereinheit 14 kann einen Mikrocontroller, eine Prozessoreinrichtung und/oder ein neuronales Netz aufweisen. In der in Fig. 1 dargestellten Situation soll das Fahrzeug 10 vom ersten Punkt P1 zum zweiten Punkt P2

gelangen. Dabei sollen insbesondere Kollisionen mit dem Vogel 20 und der anderen Drohne 25 sicher vermieden werden.

Im Bereich der Kollisionserkennung werden häufig sogenannte Monte-Carlo-Methoden eingesetzt. Diese Monte-Carlo-Methoden sind allerdings häufig sehr rechenintensiv und die Rechenlaufzeit ist abhängig von der Sampleanzahl. Zudem ist das Monte-Carlo-Verfahren ein stochastisches Verfahren und somit nicht deterministisch. Es können keine unteren oder oberen Grenzen abgeschätzt werden. Allenfalls können gewisse Konfidenzintervalle angegeben werden. Andere Verfahren wiederum versuchen, mittels einer entsprechend angepassten numerischen Integration die Kollisionswahrscheinlichkeit zu berechnen. Solche Verfahren scheiterten bisher allen voran daran, da sie extrem rechenintensiv sind beziehungsweise dass die Rechenlaufzeit von der Anzahl der Diskretisierungsschritte abhängig ist. Häufig gelingt es zwar, durch geschickte Transformationen und Umformungen eine Reduktion von Freiheitsgraden zu bewirken, jedoch resultiert daraus meist ein weiterer Nachteil. In vielen Fällen leidet darunter die Genauigkeit, was dazu führt, dass die Kollisionswahrscheinlichkeit nicht mehr realistisch berechnet wird. Wird dann versucht, diese Ungenauigkeit durch eine entsprechende feinere Diskretisierung wieder herzustellen, leidet darunter entsprechend die Rechenzeit. Es ist somit äußerst schwierig, die Kollisionswahrscheinlichkeit zuverlässig, also genau genug und zugleich schnell genug, zu berechnen oder zu ermitteln.

Das in dieser Anmeldung vorgestellte Verfahren bietet eine Lösung an, welche einen guten Kompromiss zwischen der Rechenzeit und Genauigkeit hinsichtlich des Ermittelns der Kollisionswahrscheinlichkeit bietet. Darüber hinaus beschäftigen sich viele Methoden nur mit Kollisionsvermeidungen im Straßenverkehr, betrachten eine Kollision also nur im Zweidimensionalen. Werden Kollisionen im dreidimensionalen Raum betrachtet, so geschieht dies häufig ohne Beachtung von Unsicherheiten UN. Doch es ist wichtig, bei einer Verdichtung des Luftverkehrsraumes die Unsicherheit UN zu berücksichtigen.

Das Fahrzeug 10 in Fig. 1 ist ein Flugobjekt, welches wahlweise bemannt oder unbemannt sein kann. Das Fahrzeug 10 hat drei mögliche Trajektorien TR1, TR2 und TR3 zur Auswahl. Ziel ist es, jene Trajektorie für das Fahrzeug 10 zu ermitteln, welche eine Kollision mit dem Vogel 20 oder dem anderen Objekt 25 möglichst ausschließen kann. Um dies zu realisieren, ist eine Kritikalitätsbewertung der jeweils gewählten Trajektorie TR_i erforderlich. Die Kritikalitätsbewertung beinhaltet insbesondere das Berechnen oder Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit. Die Kollisionswahrscheinlichkeit wird insbesondere für einzelne Punkte der Trajektorie ermittelt. Wird die Kollisionswahrscheinlichkeit für mehrere Punkte

entlang der Trajektorie ermittelt, so kann daraus eine Gesamtkollisionswahrscheinlichkeit für die entsprechende Trajektorie ermittelt werden.

In Fig. 1 zeigt die zweite Trajektorie TR2 beispielhaft einige Punkte. Im Fall von Fig. 1 wird die zweite Trajektorie TR2 ausgewählt. Diese zweite Trajektorie TR2 ist diejenige von den drei Trajektorien TR1 bis TR3 mit der geringsten Kollisionswahrscheinlichkeit. Entlang dieser Trajektorie ist es somit äußerst unwahrscheinlich, mit dem Objekt Vogel 20 oder der anderen Drohne 25 zu kollidieren. Bei einem unbemannten Fahrzeug oder einem autonomen Fahrzeug mit Insassen kann insbesondere vorgesehen sein, eine Kollision vollständig zu vermeiden. Bei einem bemannten Fahrzeug 10 allerdings kann vorgesehen sein, dass lediglich eine Warnung an einen Fahrer des Fahrzeugs 10 bereitgestellt wird, um kritische Situationen im Vorfeld zu entschärfen.

Fig. 2 zeigt ein beispielhaftes Ablaufdiagramm eines möglichen Verfahrens. Im ersten Schritt S1 wird eine dreidimensionale Position x, y, z und eine Orientierung α, β, γ des Fahrzeugs 10 und des Objekts 25 erfasst oder empfangen. Die Orientierung des Fahrzeugs 10 und des Objekts kann insbesondere dreidimensional sein. Daher kann die Orientierungsangabe drei Winkel aufweisen. In einem zweiten Schritt S2 wird das Fahrzeug 10 durch mindestens einen ersten geometrischen Körper c_i, py_i approximiert. Das Fahrzeug 10 wird somit durch den wenigstens einen ersten geometrischen Körper c_i, py_i repräsentiert, angenähert und/oder dargestellt. Dabei beinhaltet der mindestens eine erste geometrische Körper c_i, py_i wenigstens einen Teil des Fahrzeugs 10. Entsprechend analog kann das Objekt 20, 25 approximiert werden.

In einem dritten Schritt S3 wird eine erste Unschärfe US1 und eine zweite Unschärfe US2 ermittelt und/oder vorgegeben. Die erste Unschärfe US1 bezieht sich auf die ersten Körper, die zweite Unschärfe bezieht sich auf die zweiten Körper. In einem vierten Schritt S4 wird eine Minkowski-Differenz D‘ für jede Kombination des mindestens einen ersten geometrischen Körpers c_i, py_i für das Fahrzeug 10 mit dem mindestens einen zweiten geometrischen Körper c_j, py_j für das Objekt 20, 25 gebildet. Dies kann zu mehreren Minkowski-Differenzen D‘ führen. In einem fünften Schritt S5 kann aus der jeweiligen ersten Unschärfe US1 und zweiten Unschärfe US2 eine dritte Unschärfe US3 berechnet werden, zum Beispiel durch Addieren der ersten und zweiten Unschärfe. Die dritte Unschärfe US3 kann durch eine entsprechende Transformation TN standardisiert werden. Des Weiteren kann im fünften Schritt S5 dieselbe Transformation TN, mit der die dritte Unschärfe US3 standardisiert wurde, auf die dazugehörige Minkowski-Differenz D‘ angewendet werden. Dies dient dazu, um jeweilige Berechnungskörper BK zu erhalten. In einem sechsten Schritt S6 kann die Kollisionswahrscheinlichkeit des Fahrzeugs 10

mit dem Objekt 20, 25 basierend auf einer räumlichen Vereinigungsmenge D“ der Berechnungskörper BK ermittelt werden. Dabei können insbesondere jeweilige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für das Fahrzeug 10 und das Objekt 20, 25 berücksichtigt werden.

In einem dynamischen Umfeld ist das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer oder Objekte 20, 25 häufig unbekannt. Daher kann insbesondere zyklisch mittels der Sensoreinheit 12 oder der Schnittstelle 15 das Umfeld des Fahrzeugs 10 erfasst werden. Die erfassten Zustände der einzelnen Objekte 20, 25 können in die Zukunft prädiziert werden. Basierend auf diesen Informationen kann eine Bewegung oder Trajektorie geplant werden. Die so ermittelte Trajektorie TR_i kann an eine Aktorik oder an die Steuereinheit 14 zur Realisierung weitergegeben werden. Dies kann insbesondere in Form von Steuersignalen erfolgen. Die Bewegungsplanung oder Trajektorienplanung sollte dabei insbesondere die Kritikalitätsbewertung vornehmen, die bevorzugt in Echtzeit erfolgen sollte, wie es diese Anmeldung vorschlägt. Dabei gilt es insbesondere, die Unsicherheit UN der Sensoreinheit 12 sowie der Prädiktion zu berücksichtigen. Die Kritikalität wird insbesondere durch die Kollisionswahrscheinlichkeit ausgedrückt beziehungsweise abgebildet.

Die Steuereinheit 14 kann insbesondere zum Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit für die Trajektorien TR1 bis TR7 das Verhalten der anderen Objekte 20, 25 berücksichtigen. Das Verhalten der anderen Objekte 20, 25 kann mathematisch mittels sogenannter Handlungshypothesen ausgedrückt werden. Multiple Handlungshypothesen anderer multipler Objekte 20, 25 können diskretisiert betrachtet werden. Dazu kann insbesondere folgende Formel verwendet werden.

$$P(h_{TR2}) = \sum_i \sum_k \sum_g p(h_{g,k}) \cdot p(C_{i,g,k}) \quad \text{Formel 16}$$

Dabei gilt in Formel 16: $P(h_{TR2})$ repräsentiert die Kollisionswahrscheinlichkeit für die zweite Trajektorie TR2. $p(h_{g,k})$ repräsentiert die Wahrscheinlichkeit eines Eintretens einer Hypothese g des Objekts k. $p(C_{i,g,k})$ repräsentiert die Kollisionswahrscheinlichkeit mit dem Objekt k. Das Verfahren zielt insbesondere auf die Berechnung von $p(C_{i,g,k})$ ab. $p(C_{i,g,k})$ kann als lokale oder momentane Kollisionswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt oder Zeitschritt i betrachtet werden. Berücksichtigt man zusätzlich die Wahrscheinlichkeit der Hypothese

$p(h_{g,k})$ so kann über mehrere Zeitpunkte t_i die Wahrscheinlichkeit für die zweite Trajektorie $P(h_{TR2})$ berechnet werden. Die Wahrscheinlichkeit für die Hypothese $p(h_{g,k})$ kann zum Beispiel abbilden, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich das Objekt verhalten wird.

Ebenso kann die Trajektorie TR_i in mehrere Zeitpunkte t_i zerlegt werden. Auf einer unteren Ebene kann daher eine momentane Kollisionswahrscheinlichkeit zu einem Zeitpunkt t_i zwischen zwei Objekten bestimmt werden. Dies ist insbesondere die Kollisionswahrscheinlichkeit zwischen dem Fahrzeug 10 und dem Objekt 20, 25. Anschließend können die jeweiligen Einzelwahrscheinlichkeiten von mehreren Zeitpunkten t_i zu einer Gesamtwahrscheinlichkeit für die zweite Trajektorie TR2 zusammengerechnet werden. Somit kann ausgehend von der Kollisionswahrscheinlichkeit für einen bestimmten Raumpunkt oder Zeitpunkt t_i ebenfalls eine Kollisionswahrscheinlichkeit für eine gesamte Trajektorie TR_i ermittelt werden.

Fig. 3 zeigt beispielhaft ein mögliches Verfahren zum Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit, bei dem das Fahrzeug 10 und das Objekt 25 mithilfe mehrerer Kugeln c_i approximiert werden. Das Fahrzeug 10 wird mittels des Vektors z_E für das Fahrzeug 10, das Objekt 25 mittels des Vektors z_T beschrieben (siehe Formel 10).

Für das Fahrzeug 10 und das Objekt 25 lässt sich somit ein System mit zwölf Freiheitsgraden formulieren. Dies kann mithilfe von Formel 11 geschehen, bei der der Vektor z zwölfdimensional ist.

In der Realität jedoch ist die Bestimmung beziehungsweise Schätzung eines Objektzustands stets unsicherheitsbehaftet. Dies unterliegt einer Unsicherheit UN. Die Unsicherheit UN ist in Fig. 3a mittels gestrichelter Ellipsen angedeutet. Die mehreren gezeigten Ellipsen um das Fahrzeug 10 oder das Objekt 25 repräsentieren Ellipsoide mit einer entsprechenden 3D-Orientierung. Die Unsicherheit UN oder die verschiedenen Unschärfen US1, US2, US3 sollten dreidimensional verstanden werden. Lediglich aus Gründen der Übersichtlichkeit oder der vereinfachten Darstellung werden die Ellipsoide als zweidimensionale Ellipsen dargestellt. Ebenso ist die Minkowski-Differenz D‘ aus denselben Gründen als Kreis statt als Kugel zu sehen. Die standardisierte dritte Unschärfe US3 in Fig. 3c ist als gestrichelter Kreis dargestellt. Auch in diesem Fall repräsentiert die dritte Unschärfe US3 eine Kugel. Das Fahrzeug 10 weist in Fig. 3a drei Ellipsen auf, welche in der Realität Ellipsoide sind. Jede dieser Ellipsen oder Ellipsoide repräsentiert ein entsprechendes Konfidenzintervall oder einen Vertrauensbereich.

Die im Vorfeld genannten Ausführungen zu Konfidenzintervallen können auf die Fig.3a bis 3d übertragen werden.

Die Unsicherheit UN kann aus einer Inertialunsicherheit, Messfehler, fehlerhafte Sensordaten, etc. resultieren. Die in Fig. 3b dargestellten Kugeln c_i sind ebenfalls nicht exakt lokalisierbar. Sie unterliegen der ersten Unschärfe US1 oder zweiten Unschärfe US2. Berücksichtigt man für alle zwölf Freiheitsgrade jeweils die dazugehörige erste oder zweite Unschärfe US1 oder US2, führt dies ebenfalls zu einem zwölfdimensionalen Zufallsvektor Z. In Bezug auf Sensordatenfusion und Prädiktionsalgorithmen können die jeweiligen Zufallsvariablen normalerweise als normalverteilt angenommen werden. Das Ermitteln des Zufallsvektors Z kann analog zu den Formeln 6 bis 9 erfolgen.

$$Z = \begin{pmatrix} Z_E^{6x1} \\ Z_T^{6x1} \end{pmatrix} =: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{12} \quad \text{Formel 17}$$

Das Bestimmen der Kollisionswahrscheinlichkeit kann mithilfe folgender Gleichungen erfolgen.

$$P(C) = \int_D pz(z)dz \; mit \; D = \{z_E \in Z_E, z_T \in Z_T | \vartheta(z_E) \wedge \vartheta(z_T) \neq \emptyset\}$$

Formel 18

Dabei repräsentiert der Großbuchstabe D ein globales Integrationsgebiet für eine Kollision, $\vartheta(z_E)$ stellt eine Menge an Punkten im Raum dar, welche vom Fahrzeug 10 abhängig vom Vektor z_E eingenommen werden. Entsprechendes gilt für $\vartheta(z_T)$. Für den Fall, dass die Wahrscheinlichkeitsfunktionen für das Fahrzeug 10 und das Objekt 25 unabhängig voneinander sind, kann jeweils für das Fahrzeug 10 und das Objekt 25 eine eigene Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion verwendet werden. Formel 5 zeigt eine beispielhafte Berechnungsmöglichkeit für diesen Fall.

Im Folgenden wird anhand der Fig. 3a bis 3d das Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit anschaulich mithilfe der Kugeln c_i als geometrische Körper, die das Fahrzeug 10 und das Objekt 25 approximieren, erläutert. Die Fig. 3a bis 3d können somit anschaulich erläutern, wie die Formel 4 effektiv und effizient ausgewertet werden kann. In Fig. 3a sind das Fahrzeug 10 sowie das Objekt 25 gezeigt. Diese beiden Gegenstände weisen einen Abstand auf, der groß genug ist, um eine Kollision sicher auszuschließen. Eine jeweilige Unsicherheit UN der

dreidimensionalen Raumposition x, y, z ist schematisch mittels mehrerer Ellipsen angedeutet. Dies bedeutet, dass die Vektoren z_E und z_T jeweils aufgrund der Unsicherheit UN etwas verschmiert sind. Bei einer Approximation mit Kugeln c_i ist dies auch gar nicht notwendig, da die Kugeln c_i auch bei einer Drehung identisch sind. Eine Kugel hat somit insbesondere keine Orientierungsinformation.

In Fig. 3b ist zu erkennen, dass das Fahrzeug 10 mittels zweier Kugeln c1 und c2 und das Objekt 25 mittels dreier Kugeln c3, c4 und c5 approximiert wurden. Aus der Unsicherheit UN kann die erste Unschärfe US1 beziehungsweise die zweite Unschärfe US2 abgeleitet werden. Im Beispiel von Fig. 3b umschließen die jeweils mehreren Kugeln c_i das Fahrzeug 10 beziehungsweise die mehreren Kugeln c_j das Objekt 25 jeweils vollständig. Im Beispiel von Fig. 3b sei angenommen, dass das Fahrzeug 10 von dem Objekt 25 noch weit genug entfernt ist, um eine Kollision ausschließen zu können. Bei einer weiteren Annäherung des Objekts 25 an das Fahrzeug 10 kann eine Kollision nicht mehr ausgeschlossen werden. In Fig. 3b ist eine Überapproximation gezeigt. In diesem Fall wird die reale tatsächliche Kollisionswahrscheinlichkeit etwas überschätzt. Eine Kollision kann eintreten, wenn mindestens eine Kombination von Kugeln des Fahrzeugs 10 mit einer weiteren Kugel des Objekts 25 kollidiert. Dies kann mathematisch durch die Formeln 13 und 14 dargestellt werden.

In Fig. 3c ist links beispielhaft eine einzige Minkowski-Differenz D‘ als Kugel um den Ursprung gezeigt. Normalerweise wird für jede Kombination von Sub-Kugeln eine eigene Minkowski-Differenz D‘ gebildet. Jedoch ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nur eine einzige Minkowski-Differenz D‘ dargestellt. In Fig. 3c wird unterstellt, dass das Objekt 25 und das Fahrzeug 10 sich weiter angenähert haben. Neben der Minkowski-Differenz D‘ sind mehrere dritte Unschärfen US3 angedeutet. Da das Fahrzeug mit 2 Kugeln c1, c2 und das Objekt 20 mit drei Kugeln c3, c4, c5 approximiert ist, resultieren daraus insgesamt sechs mögliche Kombinationen. Dies führt zu sechs Minkowski-Differenzen D‘ und ebenso sechs dritten Unschärfen US3.

Wird ein Radius r_i für die Kugeln c_i des Fahrzeugs 10 und ein Radius r_j für die Kugeln c_j des Objekts 25 angenommen, so ist die Minkowski-Differenz D‘ insbesondere eine Kugel, welche den Radius $r = r_i + r_j$ aufweist. Die Minkowski-Differenz D‘ weist ferner die dritte Unschärfe US3 auf, welche eine Summe der jeweiligen ersten Unschärfe US1 und der zweiten Unschärfe US2 ist. Idealerweise wird versucht, symmetrische Anordnungen der mehreren Kugeln $c_{i,j}$ auszuwählen. In diesem Fall ähneln sich einige Rechenschritte beziehungsweise Rechenoperationen und müssen entsprechend nur reduziert ausgeführt werden.

Die dritten Unschärfen US3 werden im weiteren Verlauf durch die Transformation TN standardisiert. Dies ist in Fig. 3c dargestellt. Durch dieses Standardisieren entsteht insbesondere aus jeder jeweiligen dritten Unschärfe US3 eine Einheitskugel um den Ursprung. Da mehrere dritte Unschärfen US3 standardisiert werden, entstehen dadurch entsprechend mehrere Einheitskugeln. Bei gleichem Radius können sich die mehreren Einheitskugeln überdecken, sodass nur eine einzige Kugel sichtbar ist.

Diese Transformation TN wird benutzt, um die Berechnungskörper BK zu bilden oder zu ermitteln. Dazu wird die dieselbe Transformation TN, die zum Standardisieren der dritten Unschärfe US3 verwendet wird, auf die zur jeweiligen dritten Unschärfe zugehörigen Minkowski-Differenz D‘ angewendet. Dies ist in Fig. 3d angedeutet. Die Transformation TN kann eine Matrix sein, welche eine Dehnung, Verzerrung, Translation, Spiegelung, Stauchung, etc. beinhaltet. Dieselbe Transformation TN, die die dritte Unschärfe US3 in eine Einheitskugel umgewandelt hat, transformiert die jeweilige Minkowski-Differenz D‘ zum jeweiligen Berechnungskörper BK. Zu jeder Minkowski-Differenz D‘ beziehungsweise zu jeder dritten Unschärfe US3 kann eine separate Transformation TN nötig sein. Im Fall von Fig. 3 gibt es sechs Minkowski-Differenzen D‘ und somit sechs Transformationen TN. Aufgrund von symmetrischen Anordnungen der geometrischen Körper c_i, py_i kann sich die Anzahl der Transformationen TN reduzieren oder der Rechenaufwand reduzieren. Eine Vereinigungsmenge D“ dieser mehreren Ellipsoide, welche die Berechnungskörper BK repräsentieren, bildet dabei die Grundlage zum Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für das Fahrzeug 10 und das Objekt 25 können über das Gebiet der Vereinigungsmenge D“ integriert oder aufsummiert werden.

Das Vereinigungsgebiet D“ ist allerdings aufgrund der mehreren Ellipsoide mathematisch nicht immer einfach zu erfassen. Aus diesem Grund schlägt die Erfindung in diesem Fall vor, einen Quader BB um die mehreren Ellipsoide zu legen. Idealerweise beinhaltet der Quader BB die gesamte Vereinigungsmenge D“ vollständig. Zugleich wird der Quader BB nicht zu groß gewählt, ist also bevorzugt volumenminimal ausgeführt. Dadurch wird die Kollisionswahrscheinlichkeit zwar etwas überschätzt, jedoch wird die Rechenkomplexität dadurch stark reduziert. Bei standardisierten Normalverteilungen sind die Koordinaten x, y und z voneinander unabhängig. Daher können die Wahrscheinlichkeiten in x-, y- und z-Richtung separat über die standardisierte Verteilungsfunktion cdf ausgewertet werden. Die Verteilungsfunktion cdf entspricht dabei der kumulierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Dies geschieht insbesondere mit Formel 15:

In Fig. 4 ist wiederum das Fahrzeug 10 sowie das Objekt 25 gezeigt. Im Unterschied zur Fig. 3 wird das Fahrzeug 10 beziehungsweise das Objekt 25 nicht durch mehrere Kugeln $c_{i,j}$ sondern durch einen ersten Polyeder py1 und einen zweiten Polyeder py2 approximiert. Im Fall der Fig. 4 sind diese Polyeder $py_{i,j}$ als Quader BB ausgestaltet. Prinzipiell verläuft das Verfahren zur Berechnung oder Ermittlung der Kollisionswahrscheinlichkeit ähnlich wie in den Fig. 3a bis 3d beschrieben wurde. Fig. 4 entspricht der Fig. 3b, mit der Maßgabe, dass anstelle von Kugeln Polyeder $py_{i,j}$ zum Approximieren eingesetzt werden. Die Ausführungen zu den Fig. 3a bis 3d gelten ebenso für Polyeder $py_{i,j}$, welche zum Approximieren verwendet werden. Es ergeben sich jedoch geringfügige Abweichungen, welche mithilfe der Fig. 6 gezeigt sind.

In Fig. 6 sind ein erstes Prisma PR1 und ein zweites Prisma PR2 gezeigt. Das zweite Prisma PR2 ist nur gestrichelt angedeutet. Innerhalb des ersten Prismas PR1 sind drei Quader BB zu erkennen. Diese drei Quader BB repräsentieren die jeweiligen Berechnungskörper BK. Das Volumen dieser drei Quader BB zusammen stellt insbesondere die Vereinigungsmenge D“ dar. Diese drei Quader BB können sich überschneiden oder überlappen. Im Beispiel von Fig. 3d kann die Vereinigungsmenge D“ ebenfalls mittels eines einfacheren geometrischen Körpers approximiert werden. Im Beispiel von Fig. 6 ist dies allerdings kein Quader, sondern das erste Prisma PR1. Idealerweise handelt es sich dabei um ein gerades, die Vereinigungsmenge D“ vollständig einschließendes volumenminimales Prisma PR1. In Fig. 6 ist das erste Prisma PR1 aus Gründen der Übersichtlichkeit etwas größer gezeichnet. Bevorzugt sind die Grundfläche und Deckfläche des ersten Prismas PR1 sowie aller weiteren Prismen PR_i parallel zueinander positioniert. Die Kollisionswahrscheinlichkeit kann in diesem Fall durch Integration der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für das Fahrzeug 10 und das Objekt 25 über das Volumen des ersten Prismas PR1 berechnet werden. Alternativ kann die Kollisionswahrscheinlichkeit über die entsprechende Gegenwahrscheinlichkeit berechnet werden. Dabei kann auf die Formel 12 zurückgegriffen werden.

Alternativ können die Berechnungskörper BK mittels mehrerer Prismen diskretisiert werden. In Fig. 6 ist beispielhaft das zweite Prisma PR2 angedeutet. Das zweite Prisma PR2 kann zu dem ersten Prisma PR1, anderes wie gezeigt, verschoben sein, wobei es immer noch parallel zum ersten Prisma PR1 ist. Das zweite Prisma PR2 kann zu dem ersten Prisma PR1 verschoben sein, wobei sich beide Prismen noch berühren. Nach dem Bilden der Berechnungskörper BK wird nicht ein einzelnes gerades Prisma PR1, sondern mehrere sich berührende gerade, idealerweise volumenminimale, Prismen PR_i zur Einhüllung der Berechnungskörper BK ausgewählt. Dadurch können die Berechnungskörper BK engmaschiger in Abhängigkeit von den Diskretisierungsschritten umschlossen werden. Häufig weisen die mehreren Polyeder $py_{i,j}$

dieselbe erste oder zweite Unschärfe US1, US2 auf. Daraus können sich für mehrere Minkowski-Differenzen D‘ dieselbe Transformation TN für mehrere Prismen PR_i ergeben. Im Idealfall muss die Transformation TN nur einmal bestimmt werden.

In Fig. 5 ist zur weiteren Erläuterung beispielhaft eine Ermittlung der Kollisionswahrscheinlichkeit im zweidimensionalen Raum schematisch dargestellt. Fig. 5a zeigt schematisch die Verfahrensschritte S1 bis S3. Zwei Objekte werden mittels eines Rechtecks approximiert. Die jeweilige erste oder zweite Unschärfe US1, US2 ist durch jeweilige Ellipsen dargestellt. Die zugrundeliegenden Kovarianzmatrizen sowie Normalverteilungen sind zweidimensional ausgeführt. Der Übergang von Fig. 5a zu Fig. 5b repräsentiert insbesondere den vierten Schritt S4 des Verfahrens. Dies entspricht dem Bilden der Minkowski-Differenz D‘. Dabei ist schematisch zu erkennen, dass die beiden Rechtecke mehrfach verschoben wurden, um die Minkowski-Differenz D‘ abzubilden. Die dritte Unschärfe US3 in Fig. 5b ist bevorzugt die Summe aus der ersten Unschärfe US1 und der zweiten Unschärfe US2. Da die Fig. 5b die Minkowski-Differenz D‘ darstellt, handelt es sich bei den Koordinatenachsen um Relativkoordinaten.

Der Übergang von Fig. 5b zu 5c stellt insbesondere den fünften Schritt S5 dar, das Standardisieren der dritten Unschärfe US3. Der Prozess des Standardisierens führt dazu, dass die ellipsenförmigen dritten Unschärfen US3 zu Einheitskreisen um den Ursprung transformiert werden. Jene Transformation TN, welche aus der beliebig angeordneten Ellipse den Standardkreis und den Ursprung erzeugt, kann ebenfalls auf eine Minkowski-Differenz D‘ angewendet werden. Das Ergebnis ist dabei insbesondere der Berechnungskörper BK. Dabei können mehrere Berechnungskörper BK aufgrund mehrerer Transformationen TN resultieren oder entstehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass nach dem Standardisieren der dritten Unschärfe US3 die dritte Unschärfe US3 nicht länger eine Ellipse, sondern jeweils ein Kreis um den Ursprung ist (Fig. 5c). Die dazu erforderliche Transformation TN kann eine Translation, eine Rotation und/oder Skalierung umfassen. Dieselbe Transformation TN, welche die dritte Unschärfe US3 von einer Ellipse in einen Kreis und den Ursprung transformiert hat, wird entsprechend auf die Minkowski-Differenz D‘ angewandt. Dies führt zu dem Berechnungskörper BK gemäß Fig. 5c. In diesem Fall entspricht der Berechnungskörper BK ebenfalls der Vereinigungsmenge D“. Der Prozess des Standardisierens ist in der Stochastik ein bekanntes Verfahren beziehungsweise Procedere. Jedoch kann anhand der Fig. 5 insbesondere mittels des Übergangs von Fig. 5b zu Fig. 5c der Prozess des Standardisierens etwas anschaulicher dargestellt werden.

Insgesamt zeigt die vorliegende Erfindung, dass mit dem hier beschriebenen Verfahren und dessen weiteren Ausführungsformen sich die Kollisionswahrscheinlichkeit mit einem deutlichen Rechenvorteil gegenüber anderen Verfahren wie zum Beispiel Monte-Carlo-Verfahren oder weiteren numerischen Integrationsverfahren bestimmen lässt. Diese Vorteile ermöglichen auch in komplexen Systemen mit Echtzeitanforderungen, die viele verschiedene Trajektorien auf Kollisionen prüfen müssen, die Kollisionswahrscheinlichkeit anstelle von binären Kollisionsprüfungen zu nutzen und somit Unsicherheiten im Entscheidungsprozess geeignet abzubilden. In Summe ist somit ein Rechenlaufzeitvorteil mit hoher Genauigkeit vorhanden. Somit kann für geschlossene Mobilitätsdienstleistungen, die auch Luftfahrzeuge beinhalten, der Übergang zwischen den Domänen Straße und Luftraum sicher gestaltet werden. Das Erfordernis, die Kollisionswahrscheinlichkeit schnell und sicher zu ermitteln, ergibt sich insbesondere bei einer entsprechenden Verdichtung des Verkehrsraums. Im Gegensatz zu anderen Verfahren bietet diese Erfindung ein deterministisches Verfahren zum Ermitteln der Kollisionswahrscheinlichkeit, dessen Rechenlaufzeit abschätzbar ist. Zudem ist die Rechenlaufzeit gemäß dem Verfahren und dieser Erfindung gegenüber anderen Methoden zum Berechnen der Kollisionswahrscheinlichkeit deutlich verringert. So kann zu einer Vielzahl von Trajektorien TR_i jeweils die dazugehörige Kollisionswahrscheinlichkeit bestimmt werden. Diese verringerte Rechenlaufzeit ermöglicht es, in Echtzeit eine Trajektorie für das Fahrzeug 10 zu ermitteln.

Folgende Formelzeichen werden in der Anmeldung verwendet. Zusätzlich sind die Variablen bei der jeweiligen Formel erläutert. Der Index E bezieht sich auf das Fahrzeug. Entsprechende Formelzeichen für das Objekt ($Z_T, \vartheta(z_T), etc.$) weisen den Index T auf:

A, B:	Menge A oder B
μ_E:	Erwartungswert zum Zufallsvektor Z_E
$\sum$:	Kovarianzmatrix zum Zufallsvektor Z
$\sum_E$:	Kovarianzmatrix zum Zufallsvektor Z_E
Z_E:	Zufallsvektor der Fahrzeug-Vektoren
$\vartheta(z_E)$:	Menge an Punkten, die vom Fahrzeug abhängig vom Vektor z_E eingenommen werden
$p_{Z_E}(z_E)$:	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zum Zufallsvektor Z_E abhängig vom Vektor z_E

$p_{Z(z)}$: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zum Zufallsvektor Z abhängig vom Zustand (Vektor) z

z_E: Vektor Fahrzeug

$p_{Z_E}(z_E)$: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zum Zufallsvektor Z_E abhängig vom Vektor z_E

$R(\alpha, \beta, \gamma)$: Rotationsmatrix

$distance$: Abstand von Mittelpunkten zugehöriger Unschärfen unterschiedlicher geometrischer Körper

Bezugszeichenliste

10	Fahrzeug
20	Objekt, Vogel
25	Objekt, Drohne
TR_i	jeweilige Trajektorie
KS	kartesisches Koordinatensystem
P1	erster Punkt
P2	zweiter Punkt
12	Sensoreinheit
14	Steuereinheit
15	Schnittstelle
30	Auto
S1 bis S6	erster bis sechster Schritt
US1	erste Unschärfe
US2	zweite Unschärfe
US3	dritte Unschärfe
BK	Berechnungskörper
TN	Transformation
D‘	Minkowski-Differenz
$c_{i,j}$	jeweilige Kugel
$py_{i,j}$	jeweilige Polyeder
t_i	Zeitpunkt(e)
PR_i	jeweiliges Prisma
D“	Vereinigungsmenge oder Näherung für Vereinigungsmenge

x, y, z	dreidimensionale Position, jeweilige Koordinaten
BB	Quader
i	Index für Zeitpunkt, Zeitschritt und/oder erste(n) geometrische(n) Körper
j	Index für zweite(n) geometrische(n) Körper
UN	Unsicherheit

Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln einer Kollisionswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs (10) mit einem Objekt (20, 25) in einem dreidimensionalen Raum durch Ausführen folgender Verfahrensschritte:
a) Erfassen und/oder Empfangen (S1) einer dreidimensionalen Position (x, y, z) und Orientierung (α, β, γ) des Fahrzeugs (10) und des Objekts (20, 25),
b) Approximieren (S2) des Fahrzeugs (10) durch mindestens einen ersten geometrischen Körper (c_i, py_i), wobei der mindestens eine erste geometrische Körper (c_i, py_i) einen Teil des Fahrzeugs (10) beinhaltet und Approximieren des Objekts (20, 25) durch mindestens einen zweiten geometrischen Körper (c_i, py_i), wobei der mindestens eine zweite geometrische Körper (c_i, py_i) einen Teil des Objekts (20, 25) beinhaltet,
c) Ermitteln und/oder Vorgeben (S3) einer ersten Unschärfe (US1) des mindestens einen ersten geometrischen Körpers (c_i, py_i) und einer zweiten Unschärfe (US2) des mindestens einen zweiten geometrischen Körpers (c_j, py_j),
d) Bilden (S4) einer Minkowski-Differenz (D‘) für jede Kombination des mindestens einen ersten geometrischen Körpers (c_i, py_i) mit dem mindestens einen zweiten geometrischen Körper (c_j, py_j),
e) Ermitteln einer jeweiligen dritten Unschärfe (US3) für jede Minkowski-Differenz (D‘) in Abhängigkeit von der jeweiligen ersten Unschärfe (US1) des mindestens einen ersten geometrischen Körpers (c_i, py_i) und der jeweiligen zweiten Unschärfe (US2) des mindestens einen zweiten geometrischen Körpers (c_j, py_j),
f) Standardisieren (S5) der jeweiligen dritten Unschärfe (US3) mittels einer jeweiligen Transformation (TN) und Anwenden derselben jeweiligen Transformation (TN) auf die jeweils gebildete Minkowski-Differenz (D‘) zum Ermitteln jeweiliger Berechnungskörper (BK) aus der jeweiligen Minkowski-Differenz (D‘),
g) Ermitteln (S6) der Kollisionswahrscheinlichkeit des Fahrzeugs (10) mit dem Objekt (20, 25) basierend auf einer Vereinigungsmenge (D“) der Berechnungskörper (BK) oder einer Näherung für die Vereinigungsmenge (D“).

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei ein Volumen der geometrischen Körper ($c_{i,j}$, $py_{i,j}$) für das Fahrzeug (10) und das Objekt (20, 25) in Abhängigkeit von einer digitalen Ressource bestimmt wird.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der mindestens eine erste Körper (c_i, py_i) für das Fahrzeug (10) das Fahrzeug (10) vollständig beinhaltet und der mindestens eine zweite Körper (c_j, py_j) für das Objekt (20, 25) das Objekt (20, 25) vollständig beinhaltet, oder der mindestens eine erste Körper (c_i, py_i) das Fahrzeug (10) unterapproximiert und der mindestens eine zweite Körper (c_j, py_j) das Objekt (20, 25) unterapproximiert.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die erste Unschärfe (US1) und/oder die zweite Unschärfe (US2) basierend auf einer Gauß-Normalverteilung und/oder Fehlerfortpflanzung ermittelt werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei mehrfach zu verschiedenen Zeitpunkten (t_i) die dreidimensionale Position (x, y, z) und/oder Orientierung (α, β, γ) des Objekts (20, 25) erfasst wird zum Bestimmen einer dreidimensionalen Trajektorie (TR_i) des Objekts und in Abhängigkeit von der Trajektorie (TR_i) des Objekts (20, 25) eine von mehreren Trajektorien (TR_i) für das Fahrzeug (10) ausgewählt wird, welche die geringste Kollisionswahrscheinlichkeit aufweist.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei für mehrere Punkte der Trajektorien (TR_i) für das Fahrzeug (10) jeweils die Kollisionswahrscheinlichkeit ermittelt wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Fahrzeug (10) und das Objekt (20, 25) jeweils durch mindestens ein Polyeder ($py_{i,j}$) approximiert werden und die Vereinigungsmenge (D“) der Berechnungskörper (BK) mittels eines Prismas (Pr_i) approximiert wird, wobei das Prisma (Pr_i) die Vereinigungsmenge (D“) vollständig enthält und bevorzugt das Prisma (Pr_i) anstelle der Vereinigungsmenge (D“) beim Ermitteln (S6) der Kollisionswahrscheinlichkeit berücksichtigt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die Berechnungskörper (BK) durch mehrere sich berührende Prismen (Pr_i) approximiert werden, wobei insbesondere die Prismen (Pr_i) zueinander symmetrisch sind.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das Fahrzeug (10) und das Objekt (20, 25) jeweils durch mindestens eine Kugel ($c_{i,j}$) approximiert werden und die Vereinigungsmenge (D“) der Berechnungskörper (BK) durch einen Quader (BB) approximiert wird, wobei der Quader (BB) die Vereinigungsmenge (D“) vollständig

enthält und bevorzugt der Quader (BB) anstelle der Vereinigungsmenge (D‘‘) beim Ermitteln (S6) der Kollisionswahrscheinlichkeit berücksichtigt wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei ein Objekttyp des Objekts (20, 25) mittels einer Objekterkennung erfasst wird und insbesondere in Abhängigkeit von dem Objekttyp die zweite Unschärfe (US2) für den mindestens einen zweiten Körper (c_j, py_j) ermittelt wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei alle Körper ($c_{i,j}$, $py_{i,j}$) zum Approximieren des Fahrzeugs (10) und des Objekts (20, 25) konvex sind.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei in Abhängigkeit von der ermittelten Kollisionswahrscheinlichkeit ein Steuersignal zum Manövrieren des Fahrzeugs (10) erzeugt wird und/oder ein Hinweissignal für einen Führer des Fahrzeugs (10) ausgegeben wird.

13. Vorrichtung zum Ermitteln einer Kollisionswahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs (10) mit einem Objekt (20, 25) in einem dreidimensionalen Raum aufweisend:
- mindestens eine Sensoreinheit (12) zum Erfassen (S1) einer dreidimensionalen Position (x, y, z) und Orientierung (α, β, γ) des Fahrzeugs (10) und des Objekts (20, 25) und/oder Empfangen (S1) von Informationen bezüglich der dreidimensionalen Position (x, y, z) und Orientierung (α, β, γ) des Fahrzeugs (10) und des Objekts (20, 25) mittels einer Schnittstelle (15),
- eine Steuereinheit (14), welche eingerichtet ist,
  * das Fahrzeugs (10) durch mindestens einen ersten geometrischen Körper (c_i, py_i) zu approximieren (S2), wobei der mindestens eine erste geometrische Körper (c_i, py_i) einen Teil des Fahrzeugs (10) beinhaltet und das Objekt (20, 25) durch mindestens einen zweiten geometrischen Körper (c_j, py_j) zu approximieren (S2), wobei der mindestens eine zweite geometrische Körper (c_j, py_j) einen Teil des Objekts (20, 25) beinhaltet,
  * eine erste Unschärfe (US1) des mindestens einen ersten geometrischen Körpers (c_i, py_i) und eine zweite Unschärfe (US2) des mindestens einen zweiten geometrischen Körpers (c_j, py_j) zu ermitteln und/oder vorzugeben (S3),
  * eine Minkowski-Differenz (D‘) für jede Kombination des mindestens einen ersten geometrischen Körpers (c_i, py_i) mit dem mindestens einen zweiten geometrischen Körper (c_j, py_j) zu bilden (S4),
  * eine jeweilige dritte Unschärfe (US3) für jede Minkowski-Differenz (D‘) in Abhängigkeit von der jeweiligen ersten Unschärfe (US1) des mindestens einen ersten geometrischen Körpers (c_i, py_i) und der jeweiligen zweiten Unschärfe (US2) des mindestens einen zweiten geometrischen Körpers (c_j, py_j) zu bilden,
  * die jeweilige dritte Unschärfe (US3) mittels einer jeweiligen Transformation (TN) zu standardisieren (S5) und dieselbe jeweilige Transformation (TN) auf die jeweils gebildete Minkowski-Differenz (D‘) anzuwenden, um jeweilige Berechnungskörper (BK) aus der Minkowski-Differenz (D‘) zu ermitteln und
  * die Kollisionswahrscheinlichkeit des Fahrzeugs (10) mit dem Objekt (20, 25) basierend auf einer Vereinigungsmenge (D“) der Berechnungskörper (BK) oder einer Näherung für die Vereinigungsmenge (D“) zu ermitteln (S6).

14. Computerprogrammprodukt, umfassend Befehle, die bewirken, dass die Vorrichtung des Anspruchs 13 die Verfahrensschritte nach Anspruch 1 ausführt.

15. Computerlesbares Medium, auf dem das Computerprogrammprodukt nach Anspruch 14 gespeichert ist.

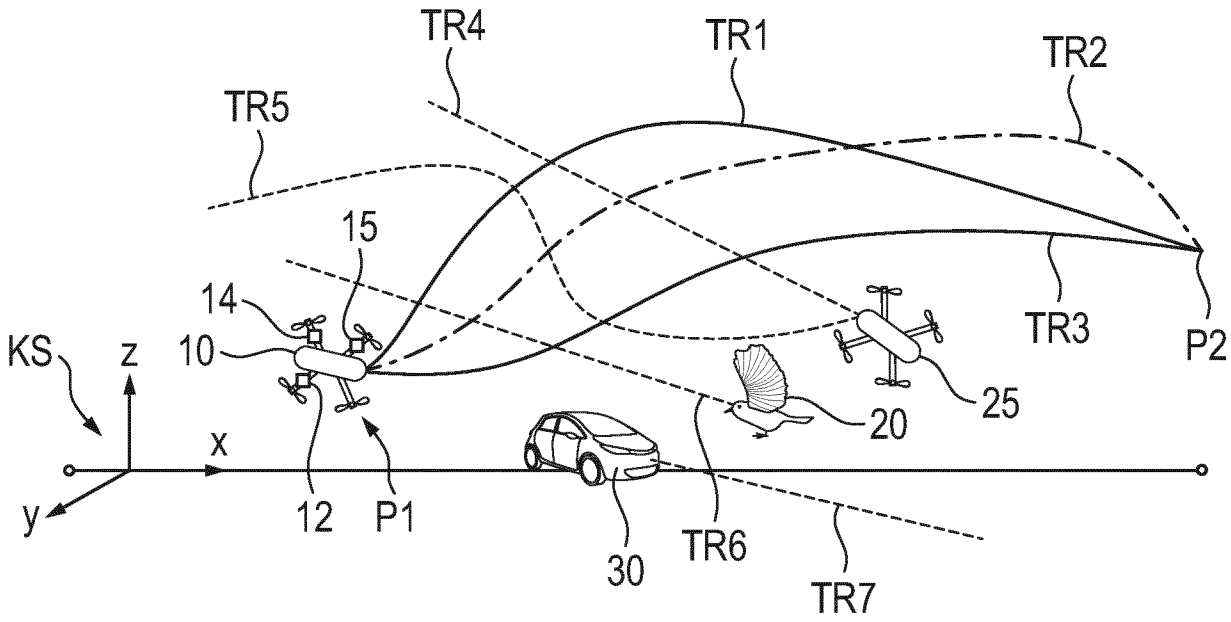

TR4
TR1
TR2
TR5
15
14
10
KS
z
x
y
12
P1
TR3
P2
25
20
30
TR6
TR7

Fig. 1

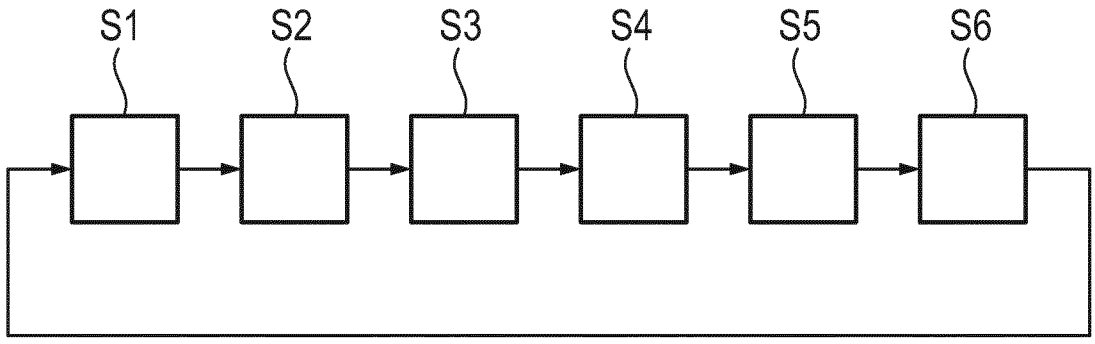

S1
S2
S3
S4
S5
S6

Fig. 2

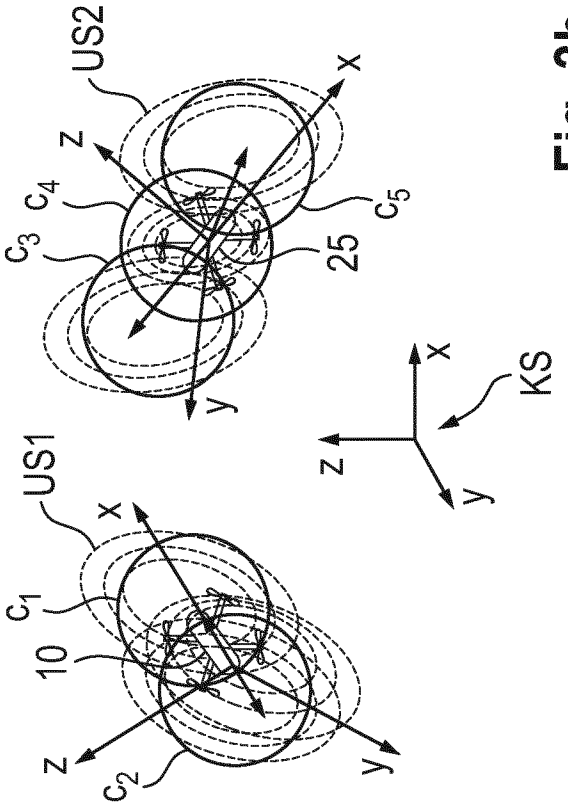


Fig. 3b

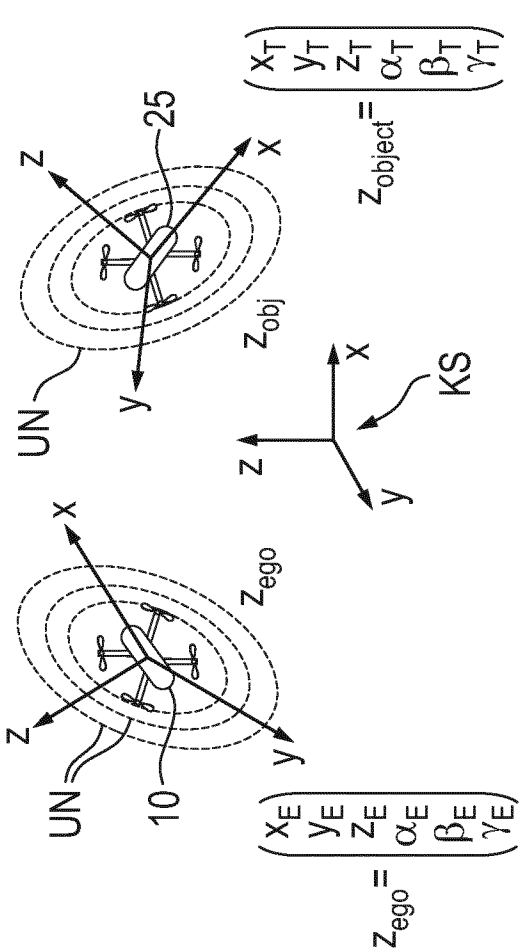


Fig. 3a

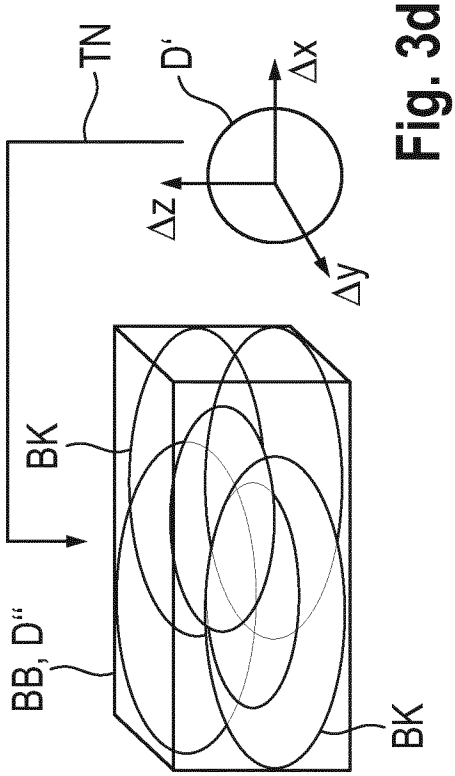


Fig. 3d

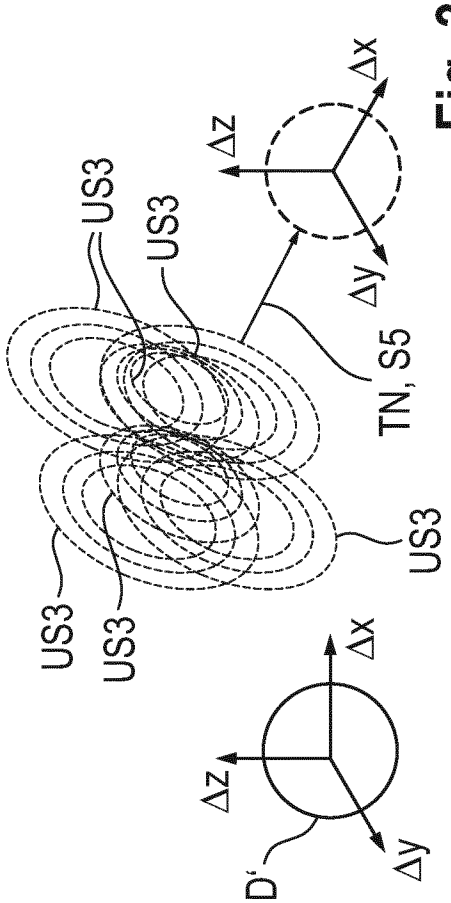
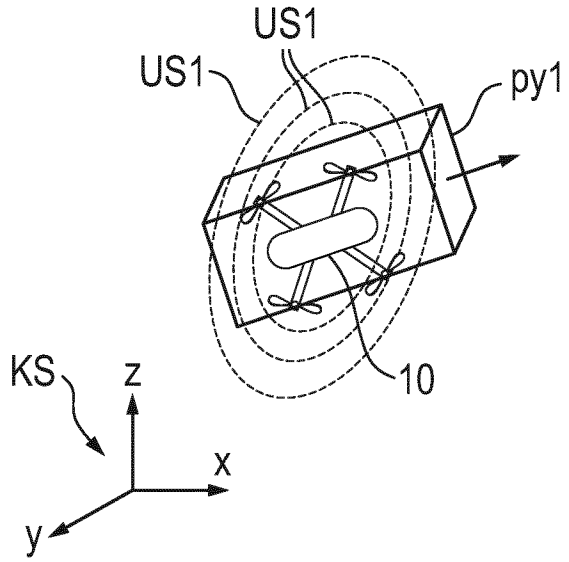


Fig. 3c



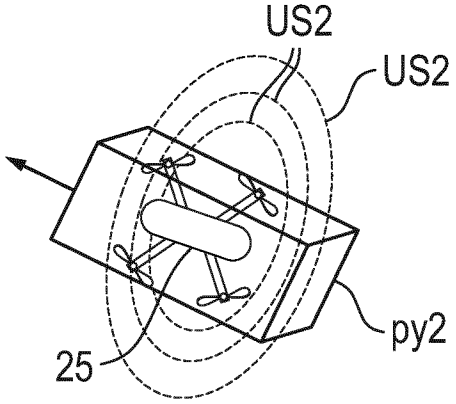


Fig. 4

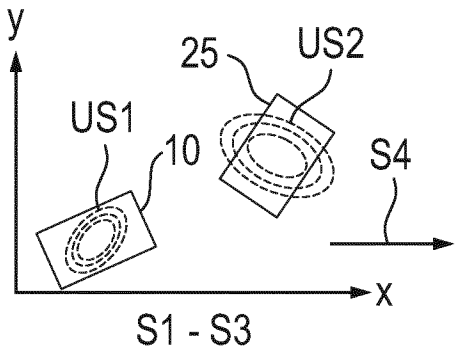


Fig. 5a

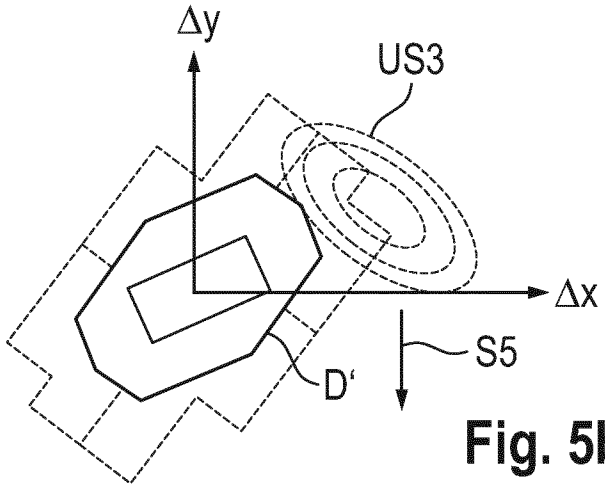


Fig. 5b

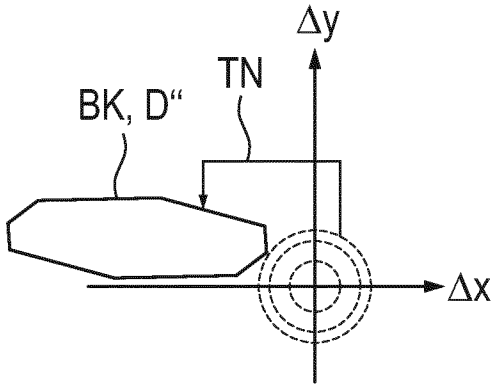


Fig. 5c

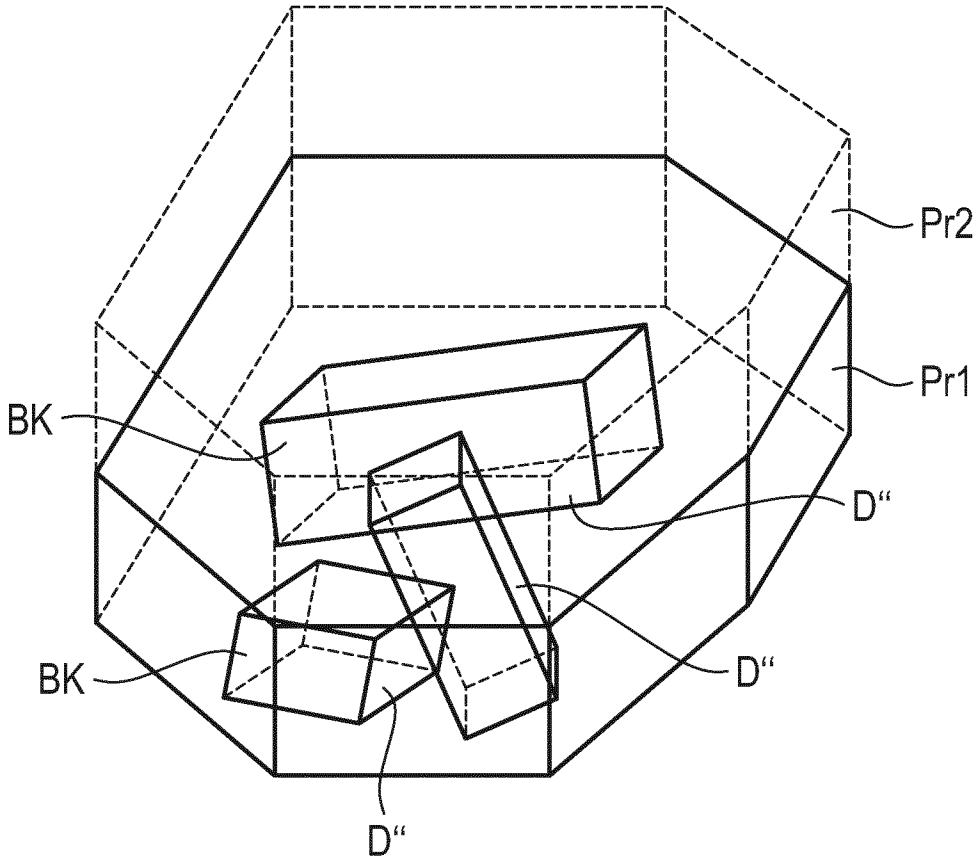


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2021/065775

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G08G 5/04(2006.01)i; ***G08G 1/16***(2006.01)i; ***G08G 7/02***(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G08G

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 102018211513 A1 (VOLKSWAGEN AG [DE]) 16 January 2020 (2020-01-16) abstract; claims; figures paragraphs [0001], [0007], [0008], [0010], [0014], [0029] - [0032], [0036] - [0039]	1-15
A	BERNABEU E J. "Distance computation for rotational and translational motions" *INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA,* 22 September 2008 (2008-09-22), pages 2732-2737 DOI: 10.1109/IROS.2008.4650665 ISBN: 978-1-4244-2057-5. XP032335262 the whole document	1-15
A	US 2015284010 A1 (BEARDSLEY PAUL A [CH] ET AL) 08 October 2015 (2015-10-08) abstract; figures paragraphs [0003], [0008], [0050] - [0053], [0089] - [0095]	1-15

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
16 September 2021	**30 September 2021**

Name and mailing address of the ISA/EP	Authorized officer
European Patent Office **p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk** **Netherlands** Telephone No. **(+31-70)340-2040** Facsimile No. **(+31-70)340-3016**	**Roost, Joseph** Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2021/065775

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
DE 102018211513 A1	16 January 2020	NONE	
US 2015284010 A1	08 October 2015	NONE	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2021/065775

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G08G5/04 G08G1/16 G08G7/02
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G08G

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 10 2018 211513 A1 (VOLKSWAGEN AG [DE]) 16. Januar 2020 (2020-01-16) Zusammenfassung; Ansprüche; Abbildungen Absätze [0001], [0007], [0008], [0010], [0014], [0029] - [0032], [0036] - [0039]	1-15
A	BERNABEU E J: "Distance computation for rotational and translational motions", INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 22. September 2008 (2008-09-22), Seiten 2732-2737, XP032335262, DOI: 10.1109/IROS.2008.4650665 ISBN: 978-1-4244-2057-5 das ganze Dokument	1-15

-/--

[X] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen [X] Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
16. September 2021	30/09/2021

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Roost, Joseph

1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2021/065775

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 2015/284010 A1 (BEARDSLEY PAUL A [CH] ET AL) 8. Oktober 2015 (2015-10-08) Zusammenfassung; Abbildungen Absätze [0003], [0008], [0050] - [0053], [0089] - [0095]	1-15

1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2021/065775

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102018211513 A1	16-01-2020	KEINE	
US 2015284010 A1	08-10-2015	KEINE	