



(11) **EP 4 570 616 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
18.06.2025 Patentblatt 2025/25

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
B61L 15/00^(2006.01) B61L 25/02^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **24218416.6**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
B61L 25/025; B61L 15/0072; B61L 25/026

(22) Anmeldetag: **09.12.2024**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA
Benannte Validierungsstaaten:
GE KH MA MD TN

(72) Erfinder:
• **Siebler, Benjamin**
82234 Weßling (DE)
• **Dr. Sand, Stephan**
82234 Weßling (DE)

(74) Vertreter: **dompatent von Kreisler Selting Werner**
-
Partnerschaft von Patent- und Rechtsanwälten mbB
Deichmannhaus am Dom
Bahnhofsvorplatz 1
50667 Köln (DE)

(30) Priorität: **07.12.2023 DE 102023134261**

(71) Anmelder: **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**
53227 Bonn (DE)

(54) **VERFAHREN ZUR MAGNETFELDBASIERTEN ERKENNUNG EINES REFERENZPUNKTES**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur magnetfeldbasierten Erkennung eines Referenzpunktes bei Durchführung mehrerer Messreihen zur Erstellung einer Magnetfeldkarte für ein Schienennetz. Das Verfahren umfasst die nachfolgenden Schritte. Eine erste Messreihe wird durchgeführt zur Ermittlung eines Magnetfeldes an mehreren Referenzpunkten innerhalb eines vorgegebenen Streckenabschnittes des Schienennetzes. Eine zweite Messreihe wird durchgeführt zur Ermittlung des Magnetfeldes an mehreren Referenzpunkten innerhalb des vorgegebenen Streckenabschnittes des Schienennetzes. An jedem der Referenzpunkte wird das Magnetfeld unter Verwendung eines Magnetfeldsensors und die Position des Referenzpunktes unter Verwendung eines Positionssensors erfasst. An jedem Referenzpunkt wird

eine lokale Magnetfeldsignatur aufgenommen und in einer Datenbank gespeichert. Jede lokale Magnetfeldsignatur gibt das lokale Magnetfeld in der Umgebung um den Referenzpunkt wieder. Mindestens eine während der zweiten Messreihe aufgenommene Magnetfeldsignatur wird mit den während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen abgeglichen. Es wird eine Identität zwischen einem innerhalb in der zweiten Messreihe erfassten Referenzpunkt sowie einem bereits in der ersten Messreihe erfassten Referenzpunkt erkannt, sofern die Magnetfeldsignatur zu dem Referenzpunkt aus der zweiten Messreihe eine Mindestähnlichkeit mit der Magnetfeldsignatur zu dem Referenzpunkt aus der zweiten Messreihe aufweist.

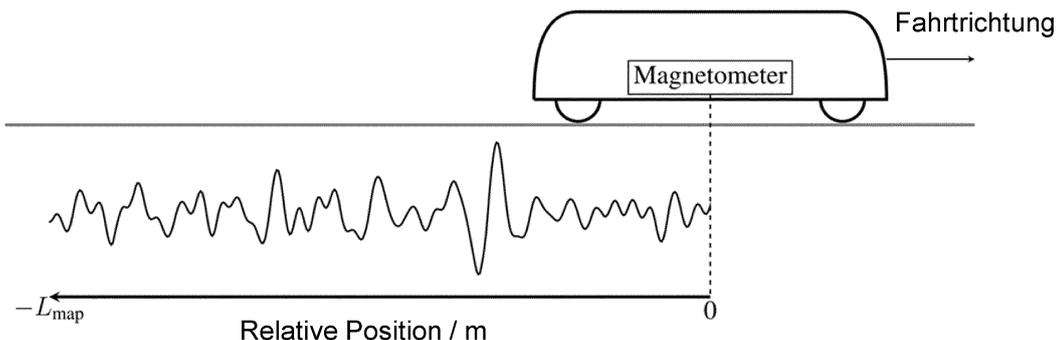


Fig. 2

EP 4 570 616 A1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur magnetfeldbasierten Erkennung eines Referenzpunktes bei der Durchführung mehrerer Messreihen zur Erstellung einer Magnetfeldkarte für ein Schienennetz. Ferner betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Erstellung einer Magnetfeldkarte, in dem die erfindungsgemäße, magnetfeldbasierte Erkennung eines Referenzpunktes zum Einsatz kommt. Zudem betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur magnetfeldbasierten Positionsbestimmung für ein Schienenfahrzeug, bei dem eine durch das erfindungsgemäße Verfahren erstellte Magnetfeldkarte zum Einsatz kommt.

[0002] Positionsbestimmungsverfahren spielen in diversen Anwendungsgebieten eine besonders bedeutende Rolle. Beispielsweise ist die präzise Bestimmung der Position eines Schienenfahrzeugs unerlässlich, wenn diese autonom angesteuert werden soll oder wenn die Positionsdaten für die Optimierung der Verkehrsführung genutzt werden soll.

[0003] Diverse Positionsbestimmungsverfahren sind weitläufig bekannt. Häufig basieren derartige Verfahren auf globalen Navigationssatellitensystemen (auch als global navigation satellite system oder GNSS bezeichnet). Dieser Ansatz ist jedoch in bestimmten Szenarien jedoch nicht oder nur eingeschränkt implementierbar. Beispielsweise in Tunneln kann nicht auf GNSS-Verfahren zurückgegriffen werden. Daher kann es in bestimmten Szenarien bevorzugt sein, auf magnetfeldbasierende Verfahren zurückzugreifen.

[0004] Magnetfeldbasierte Verfahren zur Positionsbestimmung sind in unterschiedlichen Ausführungsformen bekannt. Bei einigen dieser Verfahren kommt eine Magnetfeldkarte zum Einsatz, in der Informationen über ein Magnetfeld an verschiedenen Referenzpunkten gespeichert sind. Das Magnetfeld kann auf dem Erdmagnetfeld basieren oder alternativ durch Magnete hervorgerufen sein, die aktiv in einer bestimmten Umgebung bereitgestellt werden, um ein (örtlich) signifikant variierendes Magnetfeld zu erzeugen. Sofern eine präzise Magnetfeldkarte für eine bestimmte Umgebung vorhanden ist, innerhalb derer sich das Magnetfeld an verschiedenen Positionen unterscheidet, kann durch Kenntnis des Magnetfeldes auf die aktuelle Position eines Objektes geschlossen werden.

[0005] Die präzise Erstellung von Magnetfeldkarten stellt jedoch in der Praxis eine besondere Herausforderung dar. Dies liegt insbesondere daran, dass für die Erstellung einer Magnetfeldkarte einerseits das Magnetfeld an einzelnen Referenzpunkten bekannt sein muss, andererseits aber auch die genaue Position dieser Referenzpunkte. Dies setzt jedoch voraus, dass die Position des Referenzpunktes hinreichend genau bestimmt werden kann, ohne auf GNSS-Daten zurückzugreifen.

[0006] Aus dem Stand der Technik sind diverse Verfahren bekannt, um die genannten Magnetfeldkarten zu erstellen. Insbesondere haben sich hierzu graphen-basierte Verfahren zur simultanen Positionsbestimmung und Kartenerstellung (auch als graph Simultaneous Localization and Mapping oder graph SLAM) als geeignet erwiesen (siehe [1], [2]). Bei diesen Verfahren wird eine Strecke mehrmals abgefahren. Jedes Mal, wenn die Strecke zurückgelegt wird, erfolgt eine Messreihe, bei der das Magnetfeld an vorgegebenen Referenzpunkten (auch als Knoten oder node bezeichnet) gemessen wird (Position und Magnetfeld des jeweiligen Referenzpunktes). Aus den Informationen, die innerhalb der einzelnen Messreihen ermittelt wurden, wird dann unter Verwendung statistischer Mittel die wahrscheinliche Position der einzelnen Referenzpunkte ermittelt.

[0007] Bei dem vorstehenden Verfahren ist es erforderlich, die in einer Messreihe erfassten Referenzpunkte mit denen aus vorhergehenden Messreihen abzugleichen, um bereits zuvor aufgenommene Referenzpunkte zu identifizieren. Sofern ein während einer Messreihe erfasster Referenzpunkt in einer nachfolgenden Messreihe wiedererkannt wird, kann diese Information genutzt werden, um die Position der Referenzpunkte innerhalb der Kartendaten zu präzisieren. Jedoch stellt die Erkennung der Referenzpunkte in der Praxis als eine nicht-triviale Herausforderung dar.

[0008] Daher ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren bereitzustellen, das eine zuverlässige Erkennung eines Referenzpunktes bei der Durchführung mehrerer Messreihen zur Erstellung einer Magnetfeldkarte für ein Schienennetz erlaubt.

[0009] Zur Lösung der vorstehend genannten Aufgabe wird mit der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zur magnetfeldbasierten Erkennung eines Referenzpunktes bei

[0010] Durchführung mehrerer Messreihen zur Erstellung einer Magnetfeldkarte für ein Schienennetz vorgeschlagen, wobei das Verfahren die nachfolgenden Schritte aufweist:

- Durchführung einer ersten Messreihe zur Ermittlung eines Magnetfeldes an mehreren Referenzpunkten innerhalb eines vorgegebenen Streckenabschnittes des Schienennetzes, wobei an jedem der Referenzpunkte das Magnetfeld unter Verwendung eines Magnetfeldsensors und die Position des Referenzpunktes unter Verwendung eines Hodometers erfasst werden, wobei an jedem Referenzpunkt eine lokale Magnetfeldsignatur aufgenommen und in einer Datenbank gespeichert wird, und jede lokale Magnetfeldsignatur das lokale Magnetfeld in der Umgebung um den Referenzpunkt wiedergibt, wobei die während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen eine Länge l_{sig1} aufweisen;
- Durchführung einer zweiten Messreihe zur Ermittlung des Magnetfeldes an mehreren Referenzpunkten innerhalb des vorgegebenen Streckenabschnittes des Schienennetzes, wobei an jedem der Referenzpunkte das Magnetfeld

unter Verwendung des Magnetfeldsensors und die Position des Referenzpunktes unter Verwendung eines Hodometers erfasst werden, wobei zu jedem Referenzpunkt eine lokale Magnetfeldsignatur aufgenommen wird, und jede lokale Magnetfeldsignatur das lokale Magnetfeld in der Umgebung um den Referenzpunkt wiedergibt, wobei die während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen eine Länge l_{sig2} aufweisen;

- Abgleichen mindestens einer während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur oder eines Ausschnitts dieser Magnetfeldsignatur mit den während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen; und
- Erkennung der Identität zwischen einem innerhalb in der zweiten Messreihe erfassten Referenzpunkt sowie einem bereits in der ersten Messreihe erfassten Referenzpunkt, sofern die Magnetfeldsignatur oder der Ausschnitt der Magnetfeldsignatur zu dem Referenzpunkt aus der zweiten Messreihe eine Mindestähnlichkeit mit der Magnetfeldsignatur zu dem Referenzpunkt aus der ersten Messreihe aufweist.

[0011] Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt eine zuverlässige und präzise Detektion von zuvor erfassten Referenzpunkten innerhalb des vorgegebenen Streckenabschnittes. Dadurch kann die Präzisierung bei der Erstellung einer Magnetfeldkarte erhöht werden. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren ist vorteilhafterweise nicht darauf angewiesen, dass zusätzliche Magnete in dem Streckenabschnitt eingeführt werden. Optional können jedoch zusätzliche Magnete vorgesehen sein, um das auf dem Erdmagnetfeld basierende Magnetfeld spezifisch anzupassen.

[0012] Die Magnetfeldsignaturen, die während der ersten und der zweiten Messreihe aufgenommen werden, umfassen N Messwerte, die beispielsweise an den Referenzpunkt angrenzen können. N kann dabei beispielsweise 100, 200 oder 300 betragen, wobei ein Magnetfeldsensor beispielsweise mit einer Messfrequenz von 100 Hz aufgenommen sein kann. Die Messdaten können dabei bevorzugt interpoliert werden, wodurch die Anzahl der Werte innerhalb einer Magnetfeldsignatur erhöht werden kann. Jeder Messwert kann beispielsweise einen Vektor enthalten, der das Magnetfeld an dem jeweiligen Messpunkt beschreibt. Auch kann es vorgesehen sein, dass die Messwerte so ausgelegt sind, dass der Referenzpunkt innerhalb des definierten Messbereichs liegt. Beispielsweise kann der Referenzpunkt auch mittig innerhalb des Messbereichs liegen.

[0013] Ein Hodometer im Sinne der vorliegenden Erfindung misst im Allgemeinen eine zurückgelegte Wegstrecke eines Fahrzeuges, und wird daher auch als Wegmesseinrichtung bezeichnet. Dabei wird die relativ zu einem Bezugspunkt zurückgelegte Strecke gemessen, weshalb die Messergebnisse bei zunehmender Messstrecke einen zunehmenden Messfehler aufweisen.

[0014] Die lokalen Magnetfeldsignaturen werden jeweils unter Verwendung des Hodometers und des Magnetfeldsensors aufgenommen, wobei eine lokale Magnetfeldsignatur das Magnetfeld in der unmittelbaren Umgebung eines Referenzpunktes beschreibt.

[0015] Die Länge der Magnetfeldsignaturen, die während der ersten Messreihe aufgenommen werden, sind bevorzugt identisch ($l_{sig1} = l_{sig2}$)

[0016] Auch wenn das erfindungsgemäße Verfahren vorstehend mit zwei Messreihen beschrieben wurde, ist es für den Fachmann ersichtlich, dass in der Praxis die Durchführung von mehr als zwei Messreihen wünschenswert ist und zu einer erhöhten Präzision des Verfahrens beiträgt.

[0017] Bei einigen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens kann vorgesehen sein, dass das Verfahren die nachfolgenden Schritte aufweist:

- Abgleichen eines Ausschnitts einer während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur mit den während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen, wobei der Ausschnitt der während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur eine Länge $l_{section}$ aufweist und wobei $l_{section} < l_{sig2}$ gilt; wobei
- während des Abgleichens der Ausschnitt der während der zweiten Messreihe aufgenommenen Signatur mit den während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen ein sukzessiver Vergleich des genannten Ausschnitts mit gegeneinander verschobenen Ausschnitten einer während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur erfolgt.

[0018] Durch die Verwendung des Ausschnitts der Magnetfeldsignatur (anstatt der gesamten Magnetfeldsignatur) und den gleitenden Vergleich mit jeweils einer Magnetfeldsignatur aus der ersten Messreihe werden mehrere technische Vorteile erzielt. Insbesondere wird dadurch erreicht, dass ein Referenzpunkt auch dann erkannt wird, wenn dieser der ersten und bei der zweiten Messreihe an gegenüber einander verschobenen Positionen erkannt wird. Dadurch wird die Zuverlässigkeit der Referenzpunkterkennung signifikant erhöht und das erfindungsgemäße Verfahren somit robuster gegenüber Messungenauigkeiten des Hodometers. Je kleiner $l_{section}$ gegenüber l_{sig2} gewählt wird, desto größer ist die Erkennungstoleranz beim Abgleichen des Ausschnitts der Magnetfeldsignatur aus der zweiten Messreihe mit den Magnetfeldsignaturen aus der ersten Messreihe. Zudem wird es durch den gleiten Vergleich ermöglicht, nicht die einen Referenzpunkt zu erkennen, sondern auch gleichzeitig den Abstand des erkannten Referenzpunktes zwischen der ersten

und der zweiten Messreihe zu erkennen.

[0019] Bei einigen bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung kann vorgesehen sein, dass I_{section} maximal 75 % von I_{sig2} beträgt, dass bevorzugt I_{section} maximal 50 % von I_{sig2} beträgt und dass besonders bevorzugt I_{section} maximal 25 % von I_{sig2} beträgt. Die Wahl der Länge des Ausschnitts der Magnetfeldsignatur I_{section} hängt von mehreren Faktoren ab. Wird der Ausschnitt zu klein gewählt, dann nimmt die Präzision der Erkennung beim Abgleich ab. Wird der Ausschnitt zu groß gewählt, dann nimmt die Erkennungstoleranz ab, sodass Referenzpunkte, die zwischen der ersten und der zweiten Messreihe leicht verschoben sind, nicht wiedererkannt werden.

[0020] Gemäß einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens kann es zudem vorgesehen sein, dass I_{section} mindestens 20 % von I_{sig2} beträgt, dass bevorzugt I_{section} mindestens 40 % von I_{sig2} beträgt und dass besonders bevorzugt I_{section} mindestens 70 % von I_{sig2} beträgt.

[0021] Gemäß einigen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens kann vorgesehen sein, dass mindestens eine lokale Magnetfeldsignatur innerhalb der ersten Messreihe und/oder innerhalb der zweiten Messreihe das Magnetfeld in einem Bereich von 100 m bis 500 m, bevorzugt in einem Bereich von 200 bis 400 m wiedergibt, wobei der Bereich den dazugehörigen Referenzpunkt umfasst. Die Wahl derartiger Messbereiche für die Aufnahme der Magnetfeldsignaturen hat sich in der Praxis als geeignet erwiesen, sodass eine zuverlässige Erkennung der Referenzpunkte erreicht werden kann. Wenn die Magnetfeldsignatur einen kleineren Bereich wiedergibt, wird die Erkennung der Referenzpunkte erschwert, während die Präzision der Positionsbestimmung abnimmt, wenn die Magnetfeldsignatur einen deutlich größeren Bereich wiedergibt. Die genannten Wertebereiche stellen daher einen Kompromiss dar, der sich in der Praxis bewährt hat.

[0022] Ferner kann bei dem erfindungsgemäßen Verfahren vorgesehen sein, dass die Aufnahme mindestens einer lokalen Magnetfeldsignatur durch die Erfassung des Magnetfeldes in der Umgebung eines Referenzpunktes mit einer Messfrequenz von ≥ 10 Hz oder ≥ 30 Hz oder ≥ 50 Hz, bevorzugt mit einer Messfrequenz von ≥ 100 Hz und besonders bevorzugt mit einer Messfrequenz von ≥ 200 Hz erfolgt. Dadurch kann eine hochaufgelöste Erfassung eines charakteristischen Magnetfeldes um einen Referenzpunkt herum erreicht werden, wodurch die Erkennungsgenauigkeit der Referenzpunkte erhöht werden kann. Zudem bewirkt die hochauflösende Erfassung des Magnetfeldes in der Umgebung eines Referenzpunktes, dass insgesamt weniger Referenzpunkte zu beachten sind.

[0023] Bevorzugt kann vorgesehen sein, dass das Abgleichen mindestens einer während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur oder einem Ausschnitt dieser Magnetfeldsignatur mit den während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen basierend auf einer Korrelationsberechnung erfolgt. Dadurch kann der Ähnlichkeitsgrad in einfacher Weise bestimmt werden, sodass eine zuverlässige Entscheidung hinsichtlich der Identität zweier Referenzpunkte basierend auf das Ergebnis der Korrelationsberechnung getroffen werden kann. Wenn die Korrelationsberechnung zwischen einem Ausschnitt einer während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur und den Magnetfeldsignaturen der ersten Messreihe erfolgt, kann ermittelt werden, wie groß der Abstand zwischen zwei als identisch erkannten Referenzpunkten in der ersten und der zweiten Messreihe ist. In diesem Fall sind die Magnetfeldsignaturen der ersten Messreihe länger als der Ausschnitt der Magnetfeldsignatur, die während der zweiten Messreihe aufgenommen wurde. Es können daher in vorteilhafter Weise die Korrelationskoeffizienten für alle Position des Ausschnitts innerhalb der lokalen Messsignatur der ersten Messreihe ausgewertet werden, indem der Ausschnitt über die lokale Messsignatur der ersten Messreihe "gleitet". Dabei kann der größte ermittelte Korrelationskoeffizient ermittelt und gemeinsam mit der Position, an der dieses Maximum ermittelt wurde, gespeichert. Nachdem der Vergleich für einen Ausschnitt einer Magnetfeldsignatur der zweiten Messreihe mit allen in Frage kommenden lokalen Magnetfeldsignaturen aus der ersten Messreihe abgeglichen wurde, kann abschließend noch geprüft werden, ob der größte der ermittelten Korrelationskoeffizienten einen vorgegebenen Schwellwert überschreitet. Ist dies der Fall, so kann einerseits die Identität zwischen den Referenzpunkten erkannt werden und gleichzeitig auch die Verschiebung zwischen der ersten und der zweiten Messreihe. Auf diese Weise erlaubt der gleitende Abgleich in Kombination mit der Korrelationsberechnung eine zuverlässige Erkennung eines Referenzpunktes und seines Abstandes zwischen zwei Messreihen. Wenn die lokalen Karten der verschiedenen Referenzpunkte überlappen, kann auch die Identität zu mehrere Referenzpunkten und die jeweilige Verschiebung ermittelt werden. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn alle 50 m ein Referenzpunkt vorgesehen ist und die lokalen Karten beispielsweise eine Länge von 200 m aufweisen. Es können dann (zumindest teilweise) mehrere korrekte Loop-Closures detektiert und in den Graph eingefügt werden. Entsprechend kann gemäß einigen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung vorgesehen sein, dass eine Magnetfeldsignatur das Magnetfeld entlang einer Strecke beschreibt, die länger ist als der Abstand zwischen zwei Referenzpunkten. Auch kann vorgesehen sein, dass die durch eine Magnetfeldsignatur beschriebene Strecke mindestens doppelt so lang, mindestens dreimal so lang, oder mindestens viermal so lang wie der Abstand zwischen zwei Referenzpunkten ist.

[0024] Bei einigen bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung kann vorgesehen sein, dass jeweils ein Korrelationskoeffizient zur Bestimmung der Ähnlichkeit eines während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur mit mehreren, während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen berechnet wird, wobei der Korrelationskoeffizient mit dem größten Wert mit einem vorgegebenen Korrelations-Grenzwert verglichen wird und eine Identität zwischen einem während der zweiten Messreihe erfassten Referenzpunkt und einem während der ersten

Messreihe erfassten Referenzpunkt erkannt wird, sofern der Korrelationskoeffizient mit dem größten Wert den vorgegebenen Korrelations-Grenzwert überschreitet. Dadurch kann die Empfindlichkeit der Erkennung eines Referenzpunktes eingestellt werden, wobei der Grenzwert je nach Anwendungsgebiet und Anforderungen eingestellt werden kann.

[0025] Auch kann bei dem erfindungsgemäßen Verfahren vorgesehen sein, dass das Abgleichen des während der zweiten Messreihe erfassten Referenzpunktes mit den während der ersten Messreihe erfassten Referenzpunkte selektiv erfolgt, sodass der Abgleich lediglich mit ausgewählten Referenzpunkten erfolgt, bei denen eine erhöhte Wahrscheinlichkeit einer Identität der Referenzpunkte vorliegt. Anders ausgedrückt wird der Abgleich somit auf einen vorgegebenen Bereich beschränkt, wobei die Beschränkung bevorzugt auf Grundlage der Hodometermessdaten erfolgen kann. Wenn bei der ersten Messreihe 100 Referenzpunkte ermittelt worden sind und während der zweiten Messung bei einem neu erfassten Referenzpunkt aufgrund der vorhandenen, fehlerbehafteten Hodometermessdaten anzunehmen ist, dass der neu erfasste Referenzpunkt lediglich eine Identität mit einem der Referenzpunkte 83 bis 87 der ersten Messreihe aufweisen kann, so kann der Abgleich des (während der zweiten Messreihe) neu erfassten Referenzpunktes auf die Referenzpunkte 83 bis 87 der ersten Messreihe beschränkt werden. Dadurch kann die Effizienz des Verfahrens erhöht werden, so dass die Korrelationsberechnung sich nur noch auf eine Auswahl der Referenzpunkte beschränkt wird.

[0026] Zusätzlich wird auch die Präzision des Erkennungsverfahrens erhöht, da das Risiko einer fehlerhaften Zuordnung der Referenzpunkte reduziert wird.

[0027] Zudem kann bei dem erfindungsgemäßen Verfahren vorgesehen sein, dass die Werte der aufgenommenen lokalen Magnetfeldsignaturen interpoliert werden.

[0028] Bevorzugt kann dabei vorgesehen sein, dass das Hodometer einen Drehzahlsensor aufweist, der dazu ausgelegt ist, die Drehzahl eines Rades eines Schienenfahrzeuges zu erfassen, und/oder einen Doppler-Radarsensor, der dazu ausgelegt ist, die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeuges zu messen. Es können jedoch auch weitere, aus dem Stand der Technik bekannte Verfahren zur direkten oder indirekten Wegstreckenmessung implementiert werden. Bei der indirekten Wegstreckenmessung können beispielsweise Geschwindigkeitssensoren verwendet werden, deren Messergebnisse integriert werden.

[0029] Zudem wird mit der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zur Erstellung einer Magnetfeldkarte für einen Streckenabschnitt innerhalb eines Schienennetzes vorgeschlagen, wobei das Verfahren die nachfolgenden Schritte aufweist:

- Erstellen einer Magnetfeldkarte für einen Streckenabschnitt unter Verwendung eines graphen-basierten Verfahrens zur Simultanen Positionsbestimmung und Kartenerstellung, SLAM,
- Erkennung von Referenzpunkten, die bereits in vergangenen Messreihen erfasst wurden unter Verwendung eines der vorstehenden Referenzpunkt-Erkennungsverfahren.

[0030] Darüber hinaus kann vorgesehen sein, dass eine Kante innerhalb des SLAM-Graphen zwischen einem Referenzpunkt aus der zweiten Messreihe und einem Referenzpunkt aus der ersten Messreihe hinzugefügt wird, sofern eine Identität zwischen den genannten Referenzpunkten erkannt wurde. Dabei beschreibt die hinzugefügte Kante die Verschiebung zwischen zwei Referenzpunkten. Der Abstand wird ebenfalls durch das Magnetfeld bestimmt.

[0031] Ferner wird mit der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zur Bestimmung der Position eines Schienenfahrzeuges innerhalb eines Schienennetzes vorgeschlagen, wobei das Schienenfahrzeug einen Magnetfeldsensor aufweist und das Verfahren die nachfolgenden Schritte aufweist:

- Erstellung einer Magnetfeldkarte für einen Streckenabschnitt innerhalb eines Schienennetzes nach einem der vorherigen Verfahren zur Magnetfeldkarten-Erstellung;
- Erfassen eines Magnetfeldes unter Verwendung des Magnetfeldsensors;
- Abgleichen des Magnetfeldes mit der Magnetfeldkarte; und
- Bestimmen der Position des Schienenfahrzeuges innerhalb des Schienennetzes in Abhängigkeit von dem zuvor erfassten Magnetfeld und der erstellten Magnetfeldkarte.

[0032] Nachfolgend wird auf weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung näher eingegangen.

[0033] Wie vorstehend ausgeführt, betrifft die vorliegende Erfindung unter anderem ein Verfahren für die Erstellung von Magnetfeldkarten entlang von Eisenbahnschienen, und zwar auch in Szenarien, in denen keine GNSS-Ortung möglich ist. Das vorgeschlagene Verfahren kann dazu verwendet werden, bestehende SLAM-Verfahren (insbesondere in pose graph SLAM) zu verbessern. Der Vorteil von Pose Graph SLAM besteht darin, dass das Problem als dünn besetzter Graph formuliert werden kann, der hinsichtlich der Rechenkomplexität und des Speicherbedarfs effizient gelöst werden kann. Gemäß einem Aspekt der vorliegenden der Erfindung kann jedem Knoten im Pose-Graphen eine lokale Magnetfeldkarte (auch als lokale Magnetfeldsignatur bezeichnet) zugeordnet werden, die aus den Messungen eines Kilometerzählers und eines Magnetometers erzeugt wird. Diese lokalen Karten werden dann verwendet, um Schleifenschlüsse (auch als Erkennung identischer Referenzpunkte oder loop-closures bezeichnet) zwischen Knoten zu erkennen und deren relative

Positionen zu berechnen. Da Schleifenschlüsse nur für nahe beieinander liegende Knoten bzw. Referenzpunkte erkannt werden können, ist der resultierende Graph spärlich besetzt und die Optimierung auf ihm kann effizient durchgeführt werden, so dass der Algorithmus auch für lange Strecken eingesetzt werden kann. Um die vorgeschlagene Methode zu bewerten, wird ein Datensatz verwendet, der mit dem advanced TrainLab der Deutschen Bahn aufgezeichnet wurde, der mit Geschwindigkeiten von bis zu 100 km/h unterwegs war. Zusätzlich wurden

[0034] Simulationen durchgeführt, um ein Szenario zu bewerten, das von den Messungen nicht abgedeckt wurde.

Motivation

[0035] Die magnetfeldbasierte Zuglokalisierung hat das Potenzial, die Lokalisierung auch in Bereichen zu ermöglichen, in denen kein GNSS verfügbar ist, wie z. B. in Tunneln, ohne dass spezielle streckenseitige Geräte zur Lokalisierung wie Balisen oder Funkbaken installiert werden müssen. Die magnetische Lokalisierung ist eine Fingerabdruckmethode und erfordert eine Karte, die einen bestimmten magnetischen Fingerabdruck oder ein bestimmtes Muster mit der Position verknüpft, an der sich das Muster befindet. Leider erfordert die Erstellung der Karte ein Positionssystem (z.B. GNSS), was zu einer Art Henne-Ei-Problem führt. Das magnetische Lokalisierungssystem erfordert eine Karte, und die Erstellung der Karte erfordert eine Referenzposition. Diese Art von Problem tritt bei vielen Anwendungen auf, z. B. in der Robotik, was zur Entwicklung einer Vielzahl von Algorithmen zur Simultanen Positionsbestimmung und Kartenerstellung (Simultaneous Localization and Mapping oder SLAM) geführt hat. Anfangs basierte SLAM auf erweiterten Kalman-Filtern, deren Komplexität quadratisch mit der Anzahl der beobachteten Landmarken zunahm und die bei stark nichtlinearen Problemen nur eine geringe Genauigkeit aufwiesen. Daher wurden alternativ Partikelfilter und Rao-Blackwellized Partikelfilter in Form des bekannten FastSLAM-Algorithmus eingeführt. Während die oben genannten Lösungen auf Filtern basieren, wurden auch Alternativen vorgeschlagen, die versuchen, eine Lösung für das SLAM-Problem durch Optimierung zu finden. Vor allem graphen-basierte Methoden wurden eingeführt, die heute aufgrund ihrer Recheneffizienz und Stabilität als Stand der Technik für SLAM gelten. Bei SLAM unterscheidet man auch zwischen landmarkenbasierten und landmarkenfreien Ansätzen. Bei der vorliegenden Erfindung kann bevorzugt ein landmarkenfreier Ansatz verwendet werden, der z.B. in [1] zu finden ist. Zudem werden mit der vorliegenden Erfindung Verbesserungen gegenüber dem in [2] beschriebenen Verfahren vorgeschlagen, wobei eine neue Schleifenschlusserkennung eingeführt wird und bevorzugt a-priori Informationskanten und absolute Messkanten eingeführt werden, die aufgrund der begrenzten Freiheit in der Trajektorie des Zuges bei der Aufnahme von Messungen erforderlich sind.

Graphen-basiertes SLAM

[0036] Nachfolgend sollen kurz die Grundlagen des graph-basierten SLAM zusammengefasst werden. Genauer gesagt soll das SLAM-Verfahren mit Pose-Graph-Optimierung erläutert werden, wonach die Karte nicht direkt geschätzt wird. Stattdessen wird dabei nur die Serie von Posen optimiert. Auf der Grundlage der erhaltenen Trajektorie kann dann die gewünschte Karte erstellt werden.

[0037] Der Ausgangspunkt für die Herleitung von graph-basiertem SLAM ist die Definition der zu optimierenden Kostenfunktion. In diesem speziellen Fall ist die Kostenfunktion die vollständige posteriore Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (probability density function - pdf) über die Trajektorie eines Zuges x

$$p(\mathbf{x}|\mathcal{Z}, \mathcal{Y}) \quad (1)$$

wobei \mathcal{Z} und \mathcal{Y} zwei Sätze von Messungen sind und die Trajektorie durch eine Folge x von Zugpositionen dargestellt wird, die in einem Vektor $x = [x_1, \dots, x_N]$ zusammengefasst sind, wobei x_i die i -te Zugposition entlang der Strecke ist. Der Satz \mathcal{Z} enthält Messungen $z_{ij} \in \mathcal{Z}$, die beschreiben, wie zwei Positionen x_i und x_j mit $i \neq j$ in der Trajektorie zueinander in Beziehung stehen. Da hier die Position eines Zuges entlang der Strecke betrachtet wird, ist die Position eindimensional, und z_{ij} ist im Grunde nur ein Maß für den Abstand zwischen x_i und x_j . Diese Art von Messungen kann von einem Hodometer bzw. von einer Wegstreckenmesseinrichtung erhalten werden, welches bzw. welche die Strecke misst, die der Zug zwischen zwei Positionen zurückgelegt hat, oder, wie in den nächsten Abschnitten näher erläutert wird, kann diese Information auch aus dem Magnetfeld selbst gewonnen werden. Im Gegensatz zur Menge \mathcal{Z} enthält die Menge \mathcal{Y} absolute Informationen über eine bestimmte Position. Daher ist ein Element y_i von \mathcal{Y} nur mit einer Position x_i verbunden. Im Folgenden wird eine Position x_i auch als Knoten bezeichnet und Messungen werden als Kanten bezeichnet. Dies wird nachfolgend noch im Zusammenhang mit der Herleitung der Kostenfunktion näher erläutert.

[0038] Das Ziel der Optimierung ist es, die maximale a-posteriori-Schätzung (maximum a-posteriori - MAP) zu finden

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} p(\mathbf{x} | \mathcal{Z}, \mathcal{Y}). \quad (2)$$

[0039] Zur Durchführung der Optimierung ist es von Vorteil, den hinteren Ausdruck in eine geeignetere Form zu zerlegen. In einem ersten Schritt wird das Gesetz für bedingte Wahrscheinlichkeiten auf den hinteren Ausdruck angewendet, um Folgendes zu erhalten

$$p(\mathbf{x} | \mathcal{Z}, \mathcal{Y}) \propto p(\mathcal{Z}, \mathcal{Y} | \mathbf{x}) p(\mathbf{x}). \quad (3)$$

[0040] Dabei ist zu beachten, dass die rechte Seite des obigen Ausdrucks nur proportional zum posteriori Ausdruck ist. Das ändert jedoch nicht die Position des Maximums. In einem zweiten Schritt wird die rechte Seite in (3) weiter zerlegt

$$\begin{aligned} p(\mathbf{x} | \mathcal{Z}, \mathcal{Y}) &\propto p(\mathcal{Z}, \mathcal{Y} | \mathbf{x}) p(\mathbf{x}) \\ &= p(\mathcal{Z} | \mathbf{x}) p(\mathcal{Y} | \mathbf{x}) p(\mathbf{x}) \\ &= p(\mathbf{x}) \prod_{\{i,j\} \in \mathcal{C}_Z} p(z_{i,j} | x_i, x_j) \prod_{i \in \mathcal{C}_Y} p(y_i | x_i). \quad (4) \end{aligned}$$

[0041] Die Elemente der Menge \mathcal{C}_Z sind Paare von Knotenindizes, für die eine relative Messung in \mathcal{Z} enthalten ist, und die Menge \mathcal{C}_Y enthält die Indizes von Positionen, für die eine absolute Messung existiert. Der Einfachheit halber wird hier nur eine relative Messung pro Knotenpaar und eine absolute Messung pro Knoten betrachtet, aber die Erweiterung auf mehrere Messungen ist problemlos möglich.

[0042] Die letzten beiden Terme in (4) sind das Produkt der Wahrscheinlichkeitsdichten der einzelnen Messungen. Für jede der Messungen wird die Wahrscheinlichkeitsdichte als gaußförmig angenommen. Für die relativen Messungen in \mathcal{Z} ist die Wahrscheinlichkeitsdichte gegeben durch

$$p(z_{i,j} | x_i, x_j) = \mathcal{N}(z_{i,j}; \tilde{z}(x_i, x_j), \Omega_{ij}^{-1}) \quad (5)$$

wobei der Mittelwert durch die vorhergesagte Messung $\tilde{z}(x_i, x_j)$ gegeben ist, die für den hier betrachteten 1D-Fall einfach $\tilde{z}(x^i, x^j) = x^i - x^j$ lautet.

[0043] Für die absoluten Messungen in \mathcal{Y} hängt die Wahrscheinlichkeit nur von einem Knoten ab

$$p(y_i | x_i) = \mathcal{N}(y_i; x_i, \Omega_i^{-1}). \quad (6)$$

[0044] Für die pdf $p(\mathbf{x})$ sei angenommen, dass nur Informationen über den ersten Knoten vorliegen. Daher wird sie auf

$$p(x_0) = \mathcal{N}(x_0; \tilde{x}_0, \Omega_0^{-1}). \quad (7)$$

gesetzt. Das Setzen von Ω_0 auf einen hohen Wert verankert den Knoten auf den Mittelwert \tilde{x}_0 von $p(\mathbf{x})$. Dieser Mittelwert kann z. B. durch GNSS ermittelt werden, bevor die Züge in einen Tunnel einfahren. Wenn keine absoluten Messungen verfügbar sind, kann der erste Knoten dazu genutzt werden das Koordinatensystem definieren.

[0045] Für Kostenfunktionen der obigen Form ist es zweckmäßig, den Logarithmus der Kostenfunktion zu optimieren. Mit den Gaußschen pdf's in (5)-(7) ergibt sich dann folgender Ausdruck

$$\begin{aligned}
 c(\mathbf{x}) &= (x_0 - \tilde{x}_0)^2 \Omega_0 + \sum_{i \in \mathcal{C}_y} (y_i - x_i)^2 \Omega_i \\
 &+ \sum_{\{i,j\} \in \mathcal{C}_z} (z_{i,j} - \tilde{z}(x_i, x_j))^2 \Omega_{ij} \\
 &= e_p(\mathbf{x})^2 \Omega_0 + \sum_{\{i,j\} \in \mathcal{C}_z} e_{ij}(\mathbf{x})^2 \Omega_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{C}_y} e_i(\mathbf{x})^2 \Omega_i, \quad (8)
 \end{aligned}$$

wobei alle konstanten Teile, die für die Optimierung nicht wichtig sind, vernachlässigt werden und die gesamte Funktion zur Vereinfachung der Ausdrücke mit -2 multipliziert wurde. Indem die Kostenfunktion mit -2 multipliziert wird, wird das Problem in ein Minimierungsproblem umgewandelt, das die Grundlage für die Optimierung sein wird

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} c(\mathbf{x}). \quad (9)$$

[0046] Die Kostenfunktion $c(x)$ kann visuell durch einen Graphen dargestellt werden, wobei jede Kante einen Term der Kostenfunktion darstellt und jeder Knoten eine zu optimierende Position ist. Ein Beispiel für einen Graphen, wie er in der Eisenbahnumgebung anzutreffen ist, ist in der Fig. 1 dargestellt. Der Graph in der Fig. 1 weist eine Diskontinuität zwischen den Posen x_5 und x_6 auf. Dies liegt daran, dass es in der Eisenbahnumgebung vorkommen kann, dass ein Zug durch einen Tunnel fährt und dann für längere Zeit nicht zurückkommt. Der SLAM-Algorithmus muss daher in der Lage sein, die Daten von mehreren diskontinuierlichen Messfahrten auf demselben Gleis zu kombinieren. Diese Diskontinuitäten sind die Motivation, bevorzugt auch absolute Positionsmessungen in den Graphen einzubeziehen, weil sie die Posen von mehreren Messfahrten auf demselben Gleis miteinander verbinden, selbst wenn der Zug den Tunnel immer aus derselben Richtung durchfährt. Außerdem helfen absolute Messungen am Anfang und am Ende eines Tunnels bei der Optimierung, den Gesamtpositionsfehler im Tunnel zu reduzieren, wenn nur relative Informationen zwischen verschiedenen Posen vorliegen.

[0047] Die Untersuchung von (8) zeigt, dass die MAP-Schätzung der Trajektorie ein gewichtetes nicht-lineares Least-Square-Problem ist. Im Rahmen der vorliegenden Erfindung kann die Least-Square-Lösung mit der Gauß-Newton-Methode gefunden werden. Dies erfordert eine Linearisierung der Fehlerfunktionen für die a-priori Information $e_p(x)$, relativen Messungen $e_{ij}(x)$ und absoluten Messungen $e_i(x)$. Die linearisierte Version dieser Funktionen ergibt sich aus ihren Taylorreihenentwicklungen um den Arbeitspunkt x^*

$$\begin{aligned}
 e_p^1(\mathbf{x}) &= e_p(\mathbf{x}^*) + \mathbf{J}_p(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \\
 e_{ij}^1(\mathbf{x}) &= e_{ij}(\mathbf{x}^*) + \mathbf{J}_{ij}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \\
 e_i^1(\mathbf{x}) &= e_i(\mathbf{x}^*) + \mathbf{J}_i(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*). \quad (10)
 \end{aligned}$$

[0048] Dabei sind \mathbf{J}_p , \mathbf{J}_{ij} und \mathbf{J}_i die entsprechenden Jacobi-Matrizen evaluiert an der Stelle x^* , d. h. die Jacobi-Matrix

$$\mathbf{J}_{ij} = \nabla_x e_{ij}(\mathbf{x}) \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*}^T$$

ergibt sich aus . Da die Fehlerfunktionen skalar sind, sind die Jacobi-Matrizen Zeilenvektoren der Dimension N und das Produkt mit dem Vektor $\Delta x = x - x^*$ ist ein Skalar. Für den Gauß-Newton-Algorithmus können die linearisierten Fehlerfunktionen in die Kostenfunktion in (8) eingesetzt werden

$$\begin{aligned}
 c^1(\mathbf{x}) &= e_p^1(\mathbf{x})^2 \Omega_0 + \sum_{\{i,j\} \in \mathcal{C}_z} e_{ij}^1(\mathbf{x})^2 \Omega_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{C}_y} e_i^1(\mathbf{x})^2 \Omega_i \\
 &= c_p(\mathbf{x}) + c_{ij}(\mathbf{x}) + c_i(\mathbf{x}). \quad (11)
 \end{aligned}$$

[0049] Die Gauß-Newton-Gleichungen erhält man, indem man den Gradienten der Kostenfunktion mit den linearisierten Fehlerfunktionen in (11) auf Null setzt

$$\nabla_{\mathbf{x}} c^1(\mathbf{x}) = \nabla_{\mathbf{x}} c_p(\mathbf{x}) + \nabla_{\mathbf{x}} c_{ij}(\mathbf{x}) + \nabla_{\mathbf{x}} c_i = \mathbf{0}. \quad (12)$$

[0050] Mit den Gradienten der einzelnen Teile der Kostenfunktion

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{x}} c_p(\mathbf{x}) &= 2\Omega_0 \mathbf{J}_p^T e_p(\mathbf{x}^*) + 2\Omega_0 \mathbf{J}_p^T \mathbf{J}_p (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \\ \nabla_{\mathbf{x}} c_{ij}(\mathbf{x}) &= \sum_{\{i,j\} \in \mathcal{C}_Z} 2\Omega_{ij} \mathbf{J}_{ij}^T e_{ij}(\mathbf{x}^*) + 2\Omega_{ij} \mathbf{J}_{ij}^T \mathbf{J}_{ij} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \\ \nabla_{\mathbf{x}} c_i(\mathbf{x}) &= \sum_{i \in \mathcal{C}_Y} 2\Omega_i \mathbf{J}_i^T e_i(\mathbf{x}^*) + 2\Omega_i \mathbf{J}_i^T \mathbf{J}_i (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \end{aligned} \quad (13)$$

ergibt sich dann eine Gleichung der Form

$$-\mathbf{b} = \mathbf{H} \Delta \mathbf{x} \quad (14)$$

mit dem Vektor

$$\begin{aligned} \mathbf{b} &= 2\Omega_0 \mathbf{J}_p^T e_p(\mathbf{x}^*) + \sum_{\{i,j\} \in \mathcal{C}_Z} 2\Omega_{ij} \mathbf{J}_{ij}^T e_{ij}(\mathbf{x}^*) + \sum_{i \in \mathcal{C}_Y} 2\Omega_i \mathbf{J}_i^T e_i(\mathbf{x}^*) \\ &= \mathbf{b}_p + \mathbf{b}_r + \mathbf{b}_a \end{aligned} \quad (15)$$

und die Matrix

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= 2\Omega_0 \mathbf{J}_p^T \mathbf{J}_p + \sum_{\{i,j\} \in \mathcal{C}_Z} 2\Omega_{ij} \mathbf{J}_{ij}^T \mathbf{J}_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{C}_Y} 2\Omega_i \mathbf{J}_i^T \mathbf{J}_i \\ &= \mathbf{H}_p + \mathbf{H}_r + \mathbf{H}_a. \end{aligned} \quad (16)$$

[0051] Um die Kostenfunktion zu minimieren, kann nun nach $\Delta \mathbf{x}$ gelöst und der geschätzte Wert für \mathbf{x} berechnet werden

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^* - \mathbf{H}^{-1} \mathbf{b}. \quad (17)$$

[0052] Dieses Verfahren wird iterativ durchgeführt, indem nach jeder Iteration $\mathbf{x}^* = \hat{\mathbf{x}}$ eingestellt wird, bis die Schätzung konvergiert ist.

50 Komplexitätserwägungen

[0053] Die Matrix \mathbf{H} , die während der Optimierung invertiert werden muss, hat die Dimension $N \times N$, wobei N die Anzahl der Knoten und damit die Dimension von \mathbf{x} ist. Für große Vektoren \mathbf{x} führt dies zu einer hohen Komplexität, insbesondere weil die Matrix \mathbf{H} nach jedem Iterationsschritt an der Position der neuen Schätzung $\hat{\mathbf{x}}$ neu berechnet werden muss. In der einfachsten Implementierung hätte dies eine Komplexität von $\mathcal{O}(N^3)$. Erfreulicherweise kann gezeigt werden, dass die Matrix \mathbf{H} typischerweise durch ihre Konstruktion dünn besetzt ist.

Relative Messungen

[0054] Im vorherigen Abschnitt wurde die allgemeine Idee des graphen-basierten SLAM-Ansatzes allgemein erläutert. Zur Verdeutlichung einiger bevorzugter Aspekte der Erfindung, sollen in diesem Abschnitt die relativen Beobachtungen und deren mögliche Gewinnung näher beschrieben werden.

1) *Odometer-Kanten*: Wie im Beispielgraphen in der Fig. 1 dargestellt, gibt es eine Kante zwischen aufeinanderfolgenden Knoten, sofern sie während desselben Laufs bzw. derselben Messreihe erstellt wurden. Die Messungen z_{ij} für die Kanten zwischen aufeinanderfolgenden Knoten werden beispielsweise von einem Kilometerzähler gewonnen. Bei Eisenbahnen kann der Kilometerzähler typischerweise durch Integration der Geschwindigkeit eines Raddrehzahlsensors oder eines Doppler-Radars ermittelt werden.

2) *Erkennung eines Schleifenschlusses bzw. eines zuvor erfassten Referenzpunktes*: Neben den Kanten aufgrund von Hodometermessungen werden vorliegend bevorzugt auch Kanten zwischen nicht aufeinanderfolgenden Knoten berücksichtigt. Eine Kante zwischen zwei nicht-konsekutiven Knoten kann eingeführt werden, wenn ein Schleifenschluss erkannt wird. Ein Schleifenschluss sollte erkannt werden, wenn ein Zug eine Position bzw. einen Referenzpunkt auf dem Gleis erneut ansteuert. Der Vorteil einer Schleifenschlusskante besteht darin, dass sie neu hinzugefügte Knoten mit älteren, bereits im Graphen vorhandenen Knoten verbindet. Grob gesagt "begrenzt" diese Verbindung zwischen neuen und alten Knoten die Gesamttrajektorie und kann daher, wenn genügend Schleifenschlüsse erkannt werden, die geschätzte Trajektorie im Vergleich zum reinen Kilometerzähler signifikant verbessern.

[0055] Wie zuvor erwähnt, betrifft ein Kernaspekt der vorliegenden Erfindung die Art und Weise, wie Schleifeneinschlüsse erkannt werden bzw. wie in vorherigen Messreihen erfasste Referenzpunkte in nachfolgenden Messreihen erkannt werden. Vorliegend wird insbesondere vorgeschlagen, Schleifeneinschlüsse zu erkennen, indem für jeden neu hinzugefügten Knoten eine lokale Karte des Magnetfelds (auch als lokale Magnetfeldsignatur) in seiner Umgebung erstellt wird. Wie diese lokalen Karten erstellt werden können, wird im nächsten Abschnitt näher erläutert. Zunächst reicht es aus zu wissen, dass eine lokale Karte bevorzugt eine Funktion ist, die als Eingabe eine eindimensionale Position aufnimmt und den entsprechenden Magnetfeldvektor an dieser Position zurückgibt. Da die Karte "lokal" ist, ist die Eingabeposition bevorzugt relativ zur Position des entsprechenden Referenzpunktes. Mit dieser lokalen Karte kann die Erkennung des

[0056] Schleifenschlusses bevorzugt in drei Schritten erfolgen, wenn ein neuer Knoten hinzugefügt wird

- Suche nach der Menge der Indizes \mathcal{L} aller Knoten, die sich in einem vordefinierten Suchradius R_{LC} um den neu erstellten Knoten befinden
- Vergleiche das Magnetfeld, das auf den letzten d_{LC} Metern der Strecke um den neuen Knotenpunkt aufgezeichnet wurde, mit den lokalen Karten aller Knotenpunkte auf \mathcal{L} und finde die Position, an der es am besten zu jeder lokalen Karte passt
- Füge eine Kante zwischen dem aktuellen Knoten und einem Knoten in \mathcal{L} hinzu, wenn die Ähnlichkeit zwischen dem aktuellen Magnetfeld und der lokalen Karte über einem definierten Schwellenwert liegt T_{LC} . Die relativen Maße der Kante sind durch die Position gegeben, an der das aktuelle Magnetfeld am besten zur lokalen Karte passt, wobei die Maße den Abstand der Punkte zueinander beschreiben.

[0057] Im Folgenden soll erläutert werden, wie die Ähnlichkeit ermittelt und wie die lokalen Karten konstruiert werden können.

[0058] 3) *Lokale Karten*: Um eine lokale Karte bzw. eine lokale Magnetfeldsignatur zu erstellen, können die Magnetfeldmessergebnisse und die Geschwindigkeit des Zuges während dieser Messungen in einem Puffer gespeichert werden. Die Zuggeschwindigkeit wird ebenfalls gemessen, z. B. mit einem Raddrehzahlgeber. Aus diesem Puffer kann nun jedes Mal, wenn ein neuer Knotenpunkt erstellt wird, eine lokale Karte berechnet werden. Zur Berechnung der Karte kann zunächst die gemessene Geschwindigkeit rückwärts in der Zeit integriert werden, beginnend mit der neuesten verfügbaren Messung. Durch die Integration der Geschwindigkeit wird nun für jede Magnetfeldmessung auch die relative Position im Verhältnis zur Position des neu erstellten Knotens zugeordnet. In einem zweiten Schritt kann eine Interpolation der magnetischen Daten auf ein äquidistantes Positionsgitter durchgeführt werden. Diese Interpolation ist vorteilhaft, da die relative Position aus der Geschwindigkeitsintegration von der Geschwindigkeit des Zuges während der Messungen abhängt und daher die Magnetfelddaten im räumlichen Bereich nicht in gleichen Abständen vorliegen, was die weitere Verarbeitung beeinflussen kann. Ein Beispiel für eine magnetische Karte und die Messung der relativen Position ist in der Fig. 2 dargestellt. Die Länge L_{map} der Karte kann frei gewählt werden. Erste Untersuchungen konnten jedoch zeigen, dass das Festsetzen der Länge auf einige hundert Meter vorteilhaft ist. Wenn die Karten zu lang werden, wird der Fehler in der relativen Position, der durch die Integration der gemessenen Zuggeschwindigkeit entsteht, zu groß. Die Wahl der

Kartenlänge ist ein Kompromiss zwischen der Maximierung der Anzahl der Schleifenschlüsse zwischen den Knotenpunkten und der Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Schleifenschlusses.

[0059] 4) *Detektor*: Mit den lokalen Karten aus dem vorherigen Abschnitt kann nun ein Detektor für Schleifenschlüsse implementiert werden. Der Detektor, der vorliegend bevorzugt vorgeschlagen wird, ist im Grunde ein Korrelator. Wenn ein neuer Knoten erstellt wird, kann seine lokale Karte erstellt und gemeinsam mit dem Knoten gespeichert werden. Anschließend kann ein Stück der Karte mit der Länge L_{sig} herausgeschnitten werden, das als magnetische Signatur oder Magnetfeldsignatur genannt wird. Die Signatur kann beispielsweise am Anfang der Karte ausgeschnitten werden. Im Allgemeinen sollte die Gleichung $L_{\text{map}} > L_{\text{sig}}$ erfüllt sein, da die gesamte Signatur mit den lokalen Karten der anderen Knoten abgeglichen werden sollte, um gute und zuverlässige Ergebnisse zu erhalten.

[0060] Um einen Schleifenschluss zu erkennen, kann die lokale Karte jedes Kandidatenknotens, der im Indexsatz \mathcal{L} enthalten ist, mit der Signatur des neu erstellten Knotens verglichen werden. Der Vergleich basiert bevorzugt auf einem Korrelationskoeffizienten. Wenn die Karte länger ist als die Signatur, kann der Korrelationskoeffizient für alle möglichen Positionen der Signatur in der lokalen Karte ausgewertet werden, indem die Signatur über die Karte "geschoben" wird. Für den Detektor wird nur der höchste Wert des Korrelationskoeffizienten und die relative Position, an der er berechnet wurde, gespeichert. Nachdem der Vergleich für alle Kandidatenknoten durchgeführt wurde, kann ein Schleifenschluss erkannt werden, wenn der gespeicherte maximale Koeffizient über dem Schwellenwert T_{LC} liegt. Für jeden erkannten Schleifenschluss wird eine relative Messkante zwischen dem entsprechenden Kandidatenknoten und dem neu erstellten Knoten eingefügt. Die Messungen z_{ij} der eingefügten Kante entspricht der Position in der lokalen Karte, an der der maximale Koeffizient beobachtet wurde. Hier sollte auf das richtige Vorzeichen geachtet werden, da das Vorzeichen von der Richtung der Kante und der Definition der relativen Position abhängt. Wenn die lokale Karte und die Signatur bei Fahrten mit unterschiedlicher Fahrtrichtung aufgezeichnet wurden, muss die Karte oder die Signatur entsprechend angepasst werden.

Auswertung

[0061] In diesem Abschnitt soll der vorgeschlagene Ansatz mit Messdaten evaluiert werden, die mit dem advanced TrainLab der Deutschen Bahn aufgezeichnet wurden. Die Messungen wurden auf der Strecke zwischen Göttingen und Kassel mit einer Geschwindigkeit von bis zu 100 km/h aufgezeichnet. Das Magnetfeld wurde mit einem Low-Cost-Magnetometer der Firma KMX gemessen und die Geschwindigkeit des Zuges mit einem Raddrehgeber der Firma Deuta ermittelt. Für die Auswertung werden die Daten von drei Fahrten auf einem etwa 3 km langen Streckenabschnitt verwendet. Während der drei Fahrten überfuhr der Zug das Gleis immer aus derselben Richtung, was für den vorgeschlagenen Ansatz nicht zwingend erforderlich ist. Das bedeutet, dass der Datensatz diskontinuierlich ist und GNSS-Messungen am Anfang und am Ende des Streckenabschnitts verwendet wurden, um die Koordinatensysteme der verschiedenen Fahrten anzugleichen. Dabei wurden GNSS-Daten nur am Anfang und am Ende verwendet, da dies einem Tunnelszenario entspricht.

[0062] In der Fig. 3 ist der endgültige Graph nach den drei Durchläufen zu sehen. Wie zu sehen ist, hat der Graph trotz der zurückgelegten Strecke von etwa 9 km nur 166 Knoten. Ein Knoten wurde nur erstellt, wenn der Zug laut Kilometerzähler 50 m im Vergleich zum letzten Knoten zurückgelegt hat. Die Spärlichkeit der Knoten kann erreicht werden, weil lokale Karten verwendet werden, die das Magnetfeld zwischen den Knoten dicht darstellen. Die Verbesserung in Bezug auf den Positionsfehler des SLAM-Algorithmus im Vergleich zum reinen ungestützten Kilometerzähler ist in der Fig. 4 dargestellt. Nach der Optimierung liegt der Fehler meist bei unter 10 m, während der reine Kilometerzähler (Hodometer) Fehler von bis zu 60 m aufweist. In den Messdaten war der Raddurchmesser gut kalibriert, so dass der Fehler des Kilometerzählers sehr klein war, weshalb bei der Auswertung der Raddurchmesser um einen Zentimeter verringert wurde, um größere Fehler im Kilometerzähler zu erhalten und um zu prüfen, ob auch dann noch die Optimierung gute Ergebnisse liefert. Es sollte zudem erwähnt werden, dass der Kilometerzähler hier recht gut zu funktionieren scheint. Bei ETCS darf der Fehler des Kilometerzählers nach 3 km bis zu $5 \text{ m} + 5 \% \times 3000 \text{ m} = 155 \text{ m}$ betragen. Für eine genaue Abbildung des Magnetfelds über größere Distanzen ist die reine Hodometermessung daher eher ungeeignet.

[0063] Um die gewünschte magnetische Karte zu erstellen, sollte eine zusätzliche Verarbeitung vorgenommen werden, da der Graph nur alle 50 m einen Knoten enthält. Für die Kartierung kann daher zwischen den Knoten interpoliert werden, um die Positionen der einzelnen Magnetfeldmessungen zu erhalten, für die kein Knoten erstellt wurde. Aufgrund des geringen Dynamik- und Beschleunigungsvermögens eines Zuges kann davon ausgegangen werden, dass eine lineare Interpolation in diesem Fall ausreichend sein sollte.

[0064] Um die Auswertung zu vervollständigen, wurde ein Zug simuliert wurde, der zweimal vorwärts und rückwärts auf derselben, ca. 5 km langen Strecke fuhr. Die für die Simulation verwendete Magnetfeldkarte wurde mit der BRB zwischen Augsburg und Friedberg gemessen. Um die Messungen zu simulieren, wurde den Wert der Karte an der aktuellen Position des Zuges genommen und es wurde Rauschen hinzugefügt. Im Vergleich zu den Messdaten ist der simulierte Datensatz kontinuierlich (in dem Sinne, dass die Zugposition nicht von einer Fahrt zur nächsten springt) und daher werden keine externen Informationen benötigen, um SLAM durchzuführen, d. h. es wird kein GNSS benötigt. Es wurde lediglich der

erste Knoten an seiner Position verankert, um das Koordinatensystem zu fixieren, wie es beim SLAM-Verfahren üblich ist.

[0065] In den Fig. 5 und 6 sind der Graph und der dazugehörige resultierende Positionsfehler dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass zur Abdeckung der fast 20 km an Daten nur 362 Knoten benötigt werden. Aus dem Graphen ist auch ersichtlich, dass die verschiedenen Fahrten nun über eine Hodometer-Kante miteinander verbunden sind, da der Zug am Ende der Strecke abbremst und dann in die entgegengesetzte Richtung zu fahren beginnt. Der Hodometer in der Simulation hat einen systematischen Fehler, der zu einem Positionsfehler von mehreren hundert Metern führt. Wie in der Fig. 6 zu erkennen ist, kann durch den Einsatz des graphen-basierten SLAM-Verfahrens der Fehler des Kilometerzählers erheblich reduziert werden. Dies wird durch die Schleifenschlüsse erreicht, die Knoten, die am Anfang des Datensatzes erstellt wurden, mit Knoten verbinden, die gegen Ende erstellt wurden. Dadurch werden Knoten mit einer geringen Unsicherheit mit Knoten mit einer hohen Unsicherheit verbunden. Die Einführung dieser Verbindungen ermöglicht es, die Positionen der Knoten zu korrigieren, die mit einer Hodometer-Position erstellt wurden, die bereits einen großen Fehler aufweist.

[0066] Diese Arbeit ist entstanden im Rahmen einer Zuwendung aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds des Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V. (Vertragsnummer ZT-I-PF-5-49 ("Ubiquitous Spatio-Temporal Learning for Future Mobility (ULearn4Mobility)")).

LITERATURVERZEICHNIS

[0067]

[1] G. Grisetti, R. Kümmerle, C. Stachniss, and W. Burgard, "A Tutorial on Graph-Based SLAM," IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 2, no. 4, pp. 31-43, 2010.

[2] J. Jung, J. Choi, T. Oh, and H. Myung, "Indoor Magnetic Pose Graph SLAM with Robust Back-End," in Robot Intelligence Technology and Applications 5. Springer International Publishing, 2019, pp. 153-163.

Patentansprüche

1. Verfahren zur magnetfeldbasierten Erkennung eines Referenzpunktes bei Durchführung mehrerer Messreihen zur Erstellung einer Magnetfeldkarte für ein Schienennetz, wobei das Verfahren die nachfolgenden Schritte aufweist:

- Durchführung einer ersten Messreihe zur Ermittlung eines Magnetfeldes an mehreren Referenzpunkten innerhalb eines vorgegebenen Streckenabschnittes des Schienennetzes, wobei an jedem der Referenzpunkte das Magnetfeld unter Verwendung eines Magnetfeldsensors und die Position des Referenzpunktes unter Verwendung eines Hodometers erfasst werden, wobei an jedem Referenzpunkt eine lokale Magnetfeldsignatur aufgenommen und in einer Datenbank gespeichert wird, und jede lokale Magnetfeldsignatur das lokale Magnetfeld in der Umgebung um den Referenzpunkt wiedergibt, wobei die während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen eine Länge l_{sig1} aufweisen;

- Durchführung einer zweiten Messreihe zur Ermittlung des Magnetfeldes an mehreren Referenzpunkten innerhalb des vorgegebenen Streckenabschnittes des Schienennetzes, wobei an jedem der Referenzpunkte das Magnetfeld unter Verwendung des Magnetfeldsensors und die Position des Referenzpunktes unter Verwendung eines Hodometers erfasst werden, wobei zu jedem Referenzpunkt eine lokale Magnetfeldsignatur aufgenommen wird, und jede lokale Magnetfeldsignatur das lokale Magnetfeld in der Umgebung um den Referenzpunkt wiedergibt, wobei die während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen eine Länge l_{sig2} aufweisen;

- Abgleichen mindestens einer während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur oder eines Ausschnitts dieser Magnetfeldsignatur mit den während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen; und

- Erkennung der Identität zwischen einem innerhalb der zweiten Messreihe erfassten Referenzpunkt sowie einem bereits in der ersten Messreihe erfassten Referenzpunkt, sofern die Magnetfeldsignatur oder der Ausschnitt der Magnetfeldsignatur zu dem Referenzpunkt aus der zweiten Messreihe eine Mindestähnlichkeit mit der Magnetfeldsignatur zu dem Referenzpunkt aus der ersten Messreihe aufweist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verfahren die nachfolgenden Schritte aufweist:

- Abgleichen eines Ausschnitts einer während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur mit den während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen, wobei der Ausschnitt der während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur eine Länge $l_{section}$ aufweist und wobei $l_{section} < l_{sig2}$

gilt; wobei

- während des Abgleichens der Ausschnitt der während der zweiten Messreihe aufgenommenen Signatur mit den während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen ein sukzessiver Vergleich des genannten Ausschnitts mit gegeneinander verschobenen Ausschnitten einer während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur erfolgt.

- 5
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** I_{section} maximal 75 % von I_{sig2} beträgt, dass bevorzugt I_{section} maximal 50 % von I_{sig2} beträgt und dass besonders bevorzugt I_{section} maximal 25 % von I_{sig2} beträgt.
- 10 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens eine lokale Magnetfeldsignatur innerhalb der ersten Messreihe und/oder innerhalb der zweiten Messreihe das Magnetfeld in einem Bereich von 100 m bis 500 m, bevorzugt in einem Bereich von 200 bis 400 m wiedergibt, wobei der Bereich den dazugehörigen Referenzpunkt umfasst.
- 15 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Aufnahme mindestens einer lokalen Magnetfeldsignatur durch die Erfassung des Magnetfeldes in der Umgebung eines Referenzpunktes mit einer Messfrequenz von ≥ 10 Hz oder ≥ 30 Hz oder ≥ 50 Hz, bevorzugt mit einer Messfrequenz von ≥ 100 Hz und besonders bevorzugt mit einer Messfrequenz von ≥ 200 Hz erfolgt.
- 20 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Abgleichen mindestens einer während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur mit der während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen basierend auf einer Korrelationsberechnung erfolgt.
- 25 7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeweils ein Korrelationskoeffizient zur Bestimmung der Ähnlichkeit eines während der zweiten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignatur mit mehreren, während der ersten Messreihe aufgenommenen Magnetfeldsignaturen berechnet wird, wobei der Korrelationskoeffizient mit dem größten Wert mit einem vorgegebenen Korrelations-Grenzwert verglichen wird und eine Identität zwischen einem während der zweiten Messreihe erfassten Referenzpunkt und einem während der ersten Messreihe erfassten Referenzpunkt erkannt wird, sofern der Korrelationskoeffizient mit dem größten Wert den vorgegebenen Korrelations-Grenzwert überschreitet.
- 30
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Abgleichen des während der zweiten Messreihe erfassten Referenzpunktes mit den während der ersten Messreihe erfassten Referenzpunkte selektiv erfolgt, sodass der Abgleich lediglich mit ausgewählten Referenzpunkten erfolgt, bei denen eine erhöhte Wahrscheinlichkeit einer Identität der Referenzpunkte vorliegt.
- 35
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Werte der aufgenommenen lokalen Magnetfeldsignaturen interpoliert werden.
- 40 10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Hodometer einen Drehzahlsensor aufweist, der dazu ausgelegt ist, die Drehzahl eines Rades eines Schienenfahrzeuges zu erfassen, und/oder einen Doppler-Radarsensor, der dazu ausgelegt ist, die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeuges zu messen.
- 45 11. Verfahren zur Erstellung einer Magnetfeldkarte für einen Streckenabschnitt innerhalb eines Schienennetzes, wobei das Verfahren die nachfolgenden Schritte aufweist:
- Erstellen einer Magnetfeldkarte für einen Streckenabschnitt unter Verwendung eines graphen-basierten Verfahrens zur Simultanen Positionsbestimmung und Kartenerstellung, SLAM,
 - Erkennung von Referenzpunkten, die bereits in vergangenen Messreihen erfasst wurden unter Verwendung eines der Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 10.
- 50
12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Kante innerhalb des SLAM-Graphen zwischen einem Referenzpunkt aus der zweiten Messreihe und einem Referenzpunkt aus der ersten Messreihe hinzugefügt wird, sofern eine Identität zwischen diesen Referenzpunkten erkannt wurde.
- 55 13. Verfahren zur Bestimmung der Position eines Schienenfahrzeuges innerhalb eines Schienennetzes, wobei das Schienenfahrzeug einen Magnetfeldsensor aufweist und das Verfahren die nachfolgenden Schritte aufweist:

EP 4 570 616 A1

- Erstellung einer Magnetfeldkarte für einen Streckenabschnitt innerhalb eines Schienennetzes nach einem der Ansprüche 11 oder 12;
- Erfassen eines Magnetfeldes unter Verwendung des Magnetfeldsensors;
- Abgleichen des Magnetfeldes mit der Magnetfeldkarte; und
- Bestimmen der Position des Schienenfahrzeuges innerhalb des Schienennetzes in Abhängigkeit von dem erfassten Magnetfeld und der Magnetfeldkarte.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

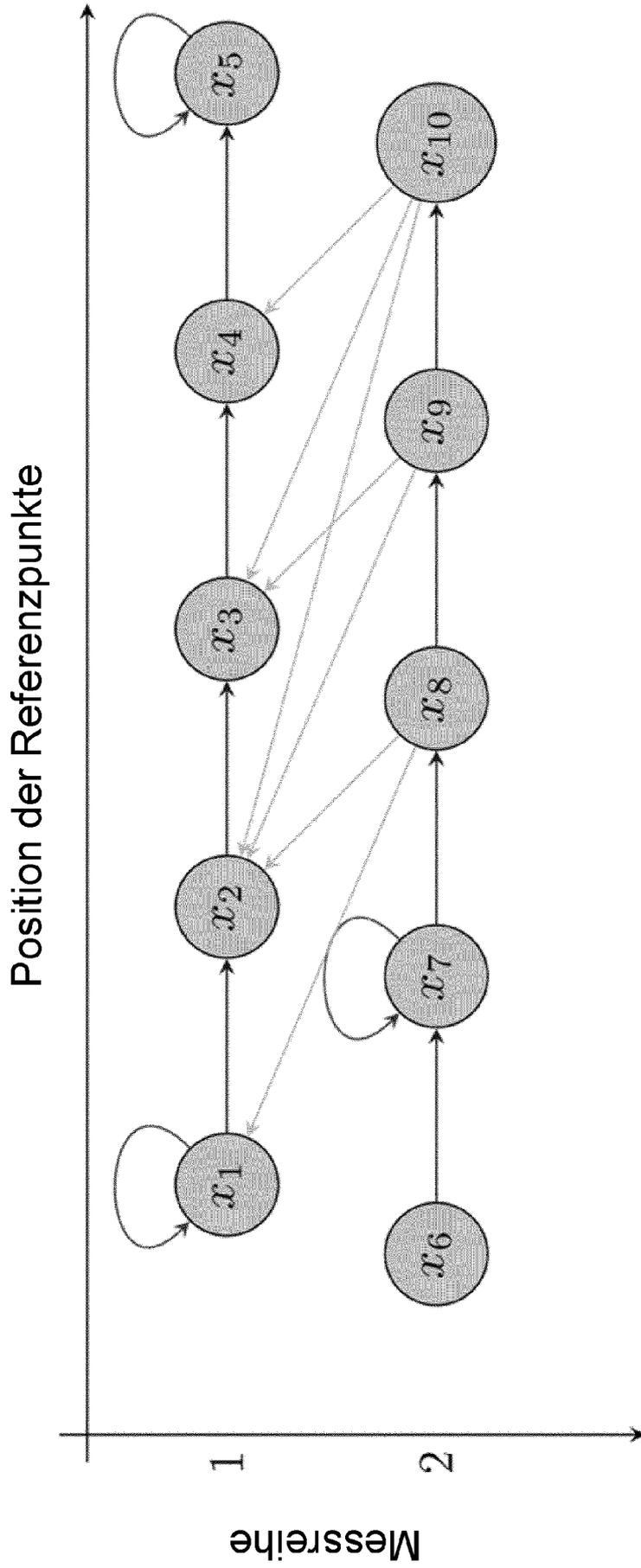


Fig. 1

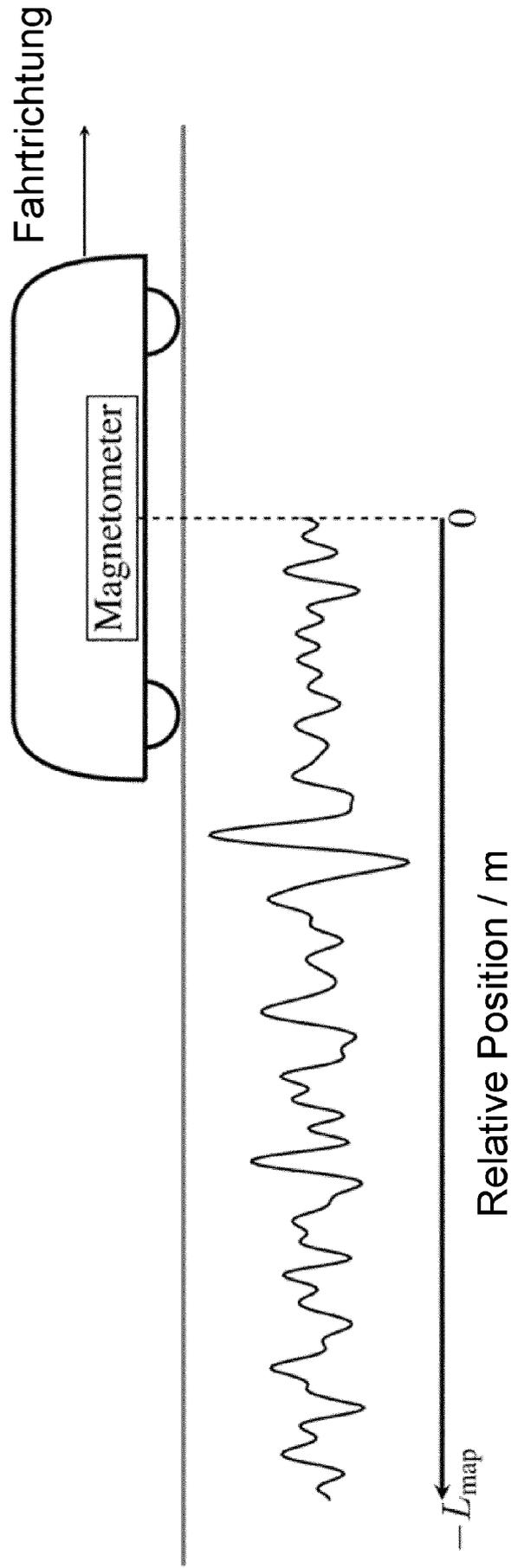
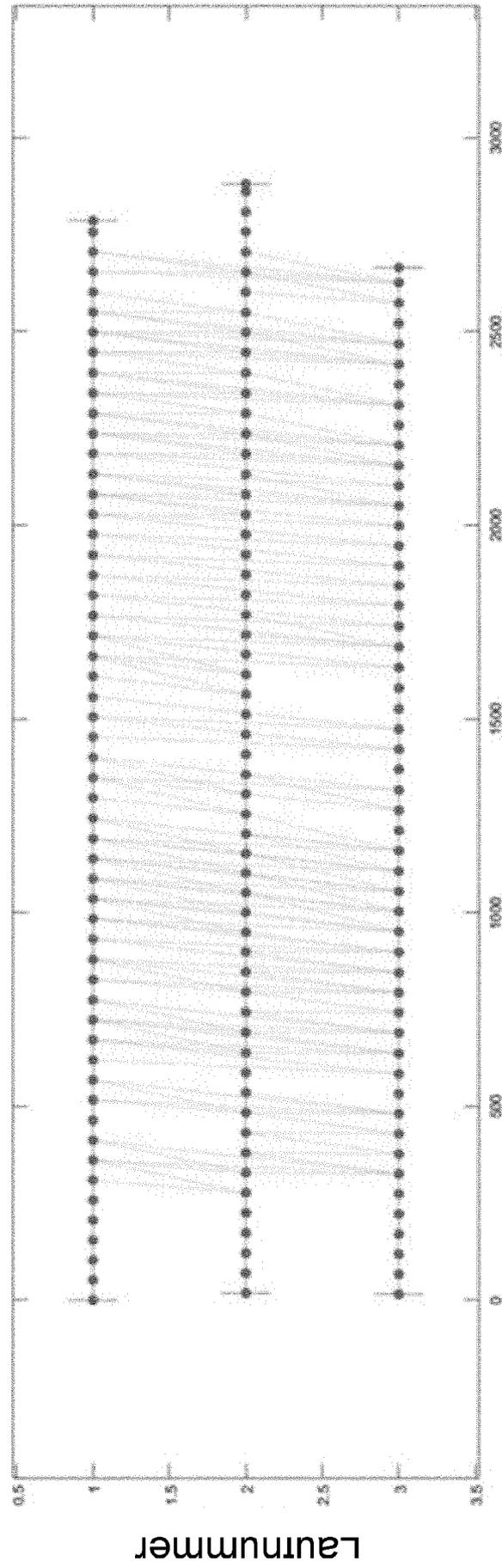


Fig. 2



Position / m

Fig. 3

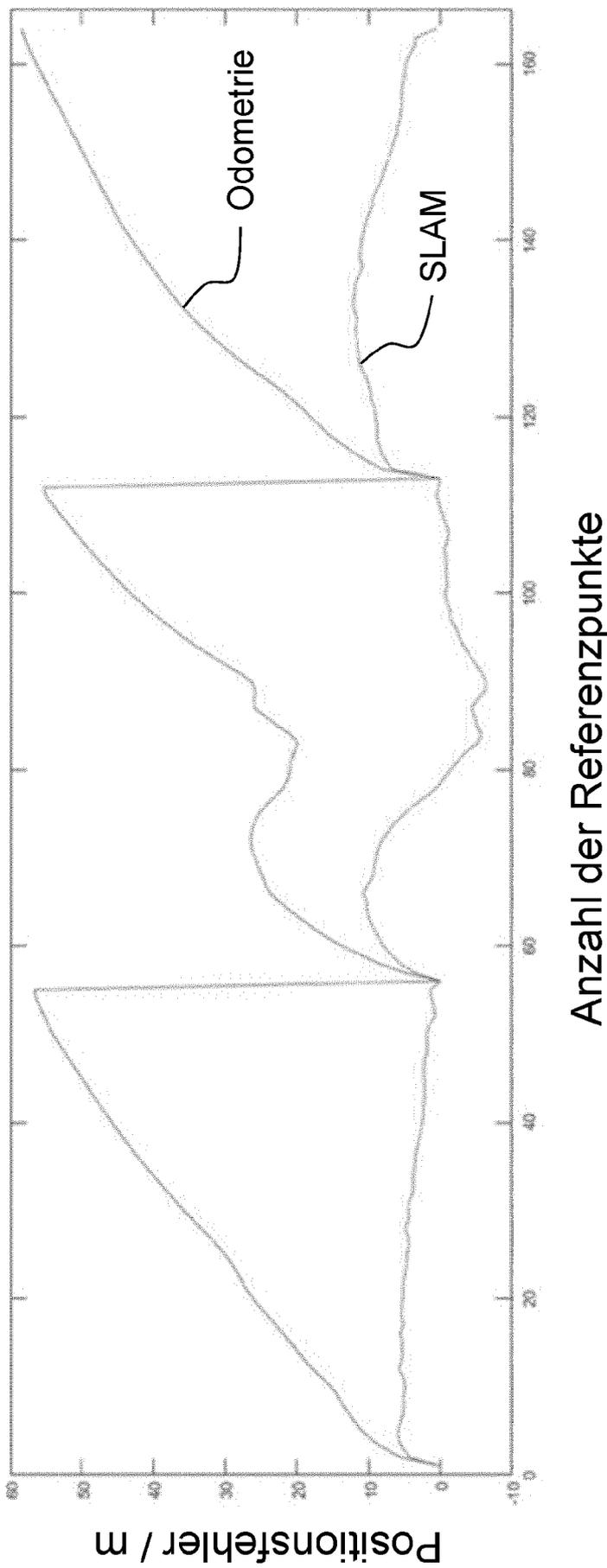


Fig. 4

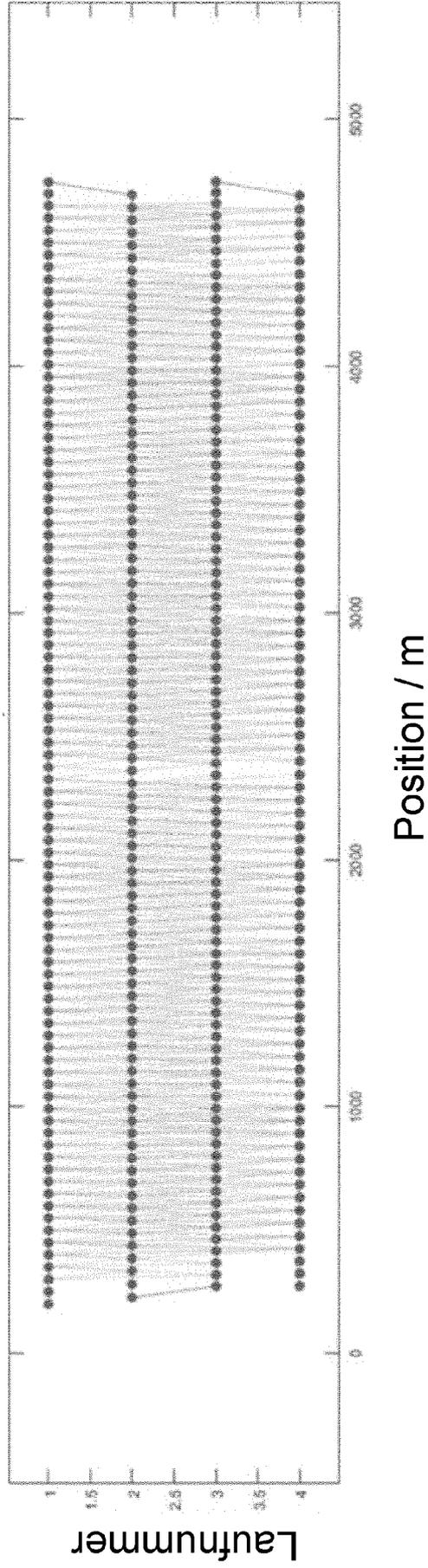


Fig. 5

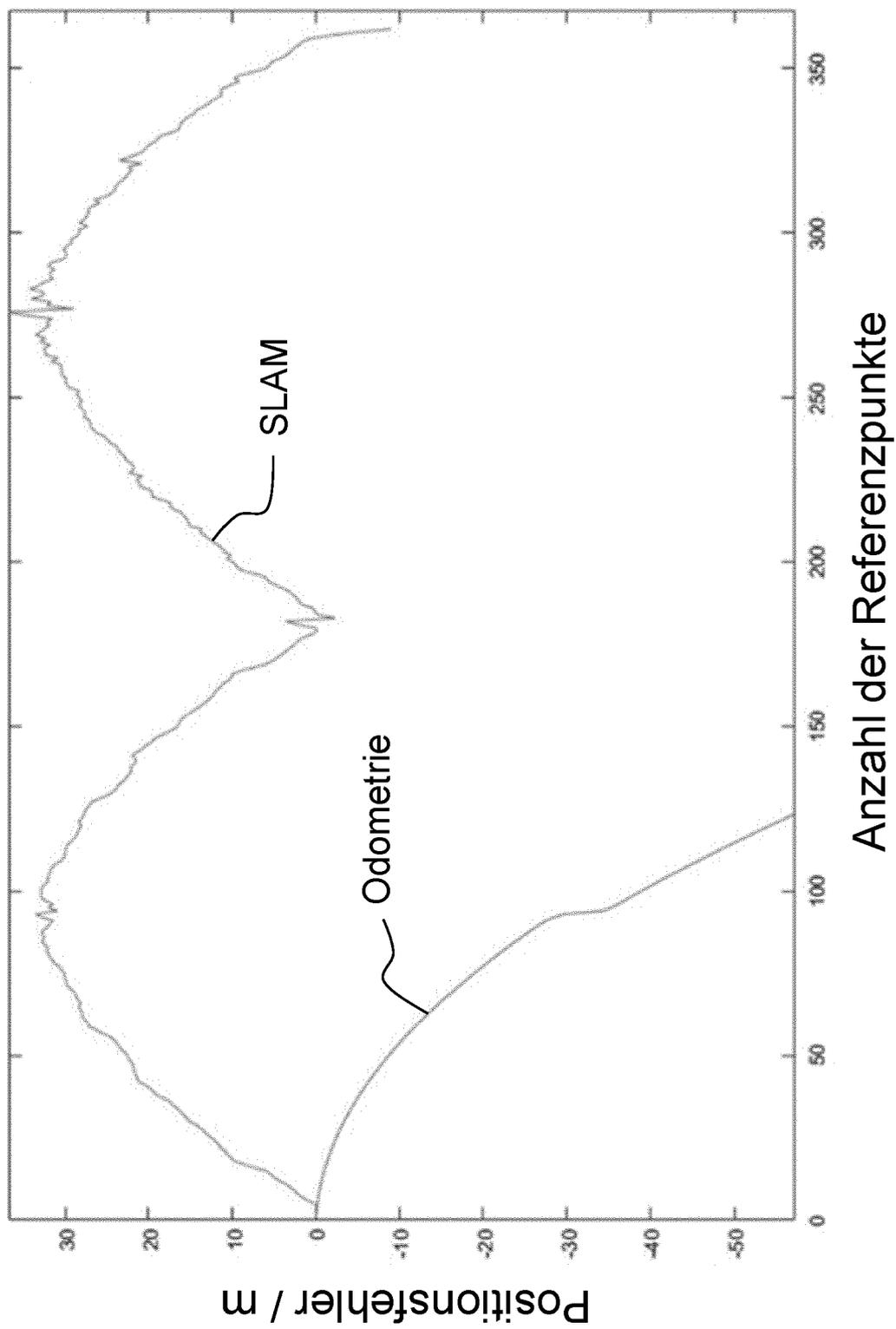


Fig. 6



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 24 21 8416

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	DE 10 2018 115373 A1 (DEUTSCH ZENTR LUFT & RAUMFAHRT [DE]) 3. Januar 2019 (2019-01-03)	1,4-13	INV. B61L15/00 B61L25/02
A	* Figuren 1 und 2; Absätze [0015], [0020], [0021] und [0023] *	2,3	
A	DE 10 2018 115978 B3 (DEUTSCH ZENTR LUFT & RAUMFAHRT [DE]) 6. Dezember 2018 (2018-12-06)	1-13	
A	DE 10 2019 118767 A1 (DEUTSCHE BAHN AG [DE]) 14. Januar 2021 (2021-01-14)	1-13	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			B61L
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 16. April 2025	Prüfer Plützer, Stefan
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 24 21 8416

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

16-04-2025

10

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102018115373 A1	03-01-2019	DE 102018115373 A1	03-01-2019
		EP 3431362 A2	23-01-2019

DE 102018115978 B3	06-12-2018	DE 102018115978 B3	06-12-2018
		FR 3068478 A1	04-01-2019

DE 102019118767 A1	14-01-2021	KEINE	

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **G. GRISSETTI ; R. KÜMMERLE ; C. STACHNISS ; W. BURGARD.** A Tutorial on Graph-Based SLAM. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2010, vol. 2 (4), 31-43 **[0067]**
- Indoor Magnetic Pose Graph SLAM with Robust Back-End. **J. JUNG ; J. CHOI ; T. OH ; H. MYUNG.** Robot Intelligence Technology and Applications. Springer International Publishing, 2019, vol. 5, 153-163 **[0067]**