

Verfahren und Vorrichtung zum Schätzen der Form einer akustischen Schleppantenne

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Schätzen der Form einer akustischen Schleppantenne mit einer Kalman-Filterung nach dem Oberbegriff von Anspruch 1 sowie eine Vorrichtung zur Schätzung der Form einer akustischen Schleppantenne mit einer Kalman-Filterung nach dem Oberbegriff von Anspruch 15.

5

Beispielsweise in "Towed Array Shape Estimation Using Kalman-Filters - Theoretical Models", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 18, no. 4, S. 543-556, 1987, D.A. Gray, B.D.O. Anderson and R.R. Bitmead, wird ein Verfahren zur Schätzung der Form einer Schleppantenne vorgestellt. Bei dem vorgestellten

10 Verfahren wird die Form der Schleppantenne anhand von Messwerten der in einer Schleppantenne eingebauten Tiefensensoren und Kompassen mit einer Kalman-Filterung geschätzt.

15

Bei dem betrachteten Verfahren wird, um die Kalman-Filterung einsetzen zu können, eine Schleppantenne vorausgesetzt, die aus einem homogenen dünnen, flexiblen und neutral getrimmten zylinderförmigen Schwimmkörper besteht, wobei der Schwimmkörper akustische Sensoren aufweist. Der Schwimmkörper entspricht somit der Akustiksektion einer realen Schleppantenne. Der Kopf des Schwimmkörpers wird ferner als Zugpunkt und dessen Zugpunktbewegung als

20 bekannt vorausgesetzt. Ferner wird die Voraussetzung getroffen, dass die Zugpunktbewegungen gleichförmig und geradlinig sind.

25

Das vorgestellte Schätzverfahren stellt ein geeignetes Verfahren zur Schätzung der Form einer Schleppantenne dar, wobei die Schätzung nur für die durch die o.g. Voraussetzungen vorgegebenen Spezialfälle möglich ist. Diese Spezialfälle

sind solange erfüllt, wie das die Schleppantenne schleppende Fahrzeug lediglich klassische "straight course-Manöver" durchführt.

Im realen Fall wird die Akustiksektion bzw. der Schwimmkörper jedoch mit einem
5 Zugseil durch ein Gewässer gezogen. Dann ist von einem Zugpunkt auszugehen, der nicht dem Kopf der Akustiksektion bzw. des Schwimmkörpers, sondern der Schnittstelle zwischen dem die Schleppantenne schleppenden Fahrzeug und dem Zugseil entspricht. Hier fehlt es dann bereits an einer der Voraussetzung für die Formschätzung mit der Kalman-Filterung, da in diesem Fall nicht mehr
10 von einem homogenen Schwimmkörper auszugehen ist. Das Schleppseil und die Akustiksektion weisen nämlich unterschiedliche physikalische Eigenschaften auf. Ferner ist gerade bei beliebigen Kurvenfahrten eine Formschätzung der Schleppantenne nötig, um auch bei diesen Kurvenfahrten die Anordnung der akustischen Sensoren zu kennen, da nur so aufgenommene Schallsignale zuverlässig
15 verarbeitet werden können.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde eine Schätzung der Form einer Schleppantenne mit einer Kalman-Filterung zu finden, die auch unter realen Bedingungen ohne die o.g. einschränkenden Voraussetzungen anwendbar ist.

20 Die Erfindung löst diese Aufgabe durch ein Verfahren zum Schätzen der Form einer akustischen Schleppantenne mit einer Kalman-Filterung nach Anspruch 1 sowie durch eine Vorrichtung zur Schätzung der Form einer akustischen Schleppantenne mit einer Kalman-Filterung nach Anspruch 15.

25 Gemäß der Erfindung wird die Form einer akustischen Schleppantenne mit einer üblichen Kalman-Filterung, also mit den als Kalman-Filter bekannten Gleichungen, geschätzt. Hierbei wird jedoch im Gegensatz zur üblichen Anwendung der Gleichungen zunächst der deterministische Anteil der Zustandsgleichung des
30 Kalman-Filters zu Null gesetzt.

Ferner werden zusätzlich zu den bei der Kalman-Filterung durchgeführten Berechnungen aufeinanderfolgende diskrete Zeitpunkte vordefiniert und eine ge-

geschätzte Form der Schleppantenne in den vordefinierten Zeitpunkten jeweils durch einen modellbasierten Zustandsvektor beschrieben. Diese modellbasierten Zustandsvektoren werden in den jeweiligen Zeitpunkten durch das geschätzte zeitliche Verhalten eines mechanischen Modells der Schleppantenne und durch
5 als bekannt vorausgesetzte Bewegungen eines beliebigen als Zugpunkt definierten Punktes der Schleppantenne ermittelt. Dieser Zugpunkt entspricht z.B. der Schnittstelle zwischen einem die Schleppantenne schleppenden Fahrzeug und einem Zugseil der Schleppantenne, wobei dann durch bekannte Kursmanöver des Fahrzeugs immer die Position bzw. die Bewegung des Zugpunktes bekannt
10 ist.

Ferner wird die Schleppantenne als in mehrere Segmente eingeteilt angenommen. Ein aktueller modellbasierter Zustandsvektor eines Zeitpunktes weist dann geschätzte Werte der aktuellen Positionen, Ausrichtungen und/oder Formen
15 mehrerer oder aller der Segmente bzw. aus diesen Werten abgeleitete Werte auf. Diese Werte bzw. diese aus den Werten abgeleiteten Werte werden mit dem mechanischen Modells der Schleppantenne und der Zugpunktbewegung ermittelt.

20 Ferner wird jeweils einer der vordefinierten Zeitpunkte, in dem die Form der Schleppantenne mit der Kalman-Filterung geschätzt werden soll, als aktueller Zeitpunkt ausgewählt. Der modellbasierte Zustandsvektor des jeweils aktuellen Zeitpunktes wird als aktueller modellbasierter Zustandsvektors bezeichnet. Ferner wird die Abweichung des jeweils aktuellen modellbasierten Zustandsvektors
25 zu einem oder mehreren vorhergehenden, also zu vorhergehenden Zeitpunkten ermittelten, modellbasierten Zustandsvektoren bestimmt. Diese Abweichung beschreibt dann die zeitliche Änderung des mechanischen Modells aufgrund auf die Schleppantenne ausgeübter Kräfte, z.B. durch Zugpunktbewegungen, Strömungen, Erdbeschleunigung oder Auftrieb. Die jeweilige aktuell bestimmte Abwei-
30 chung wird dann als Matrix betrachtet bzw. in eine Matrix überführt oder als Matrix dargestellt und diese Matrix in die Übergangsmatrix für die Kalman-Filterung überführt, sodass die Übergangsmatrix für die Kalman-Filterung durch die mit dem mechanischen Modell ermittelten Matrizen periodisch aktualisiert wird.

Das deterministische dynamische Verhalten der Schleppantenne wird also nicht mehr, wie bei der üblichen Kalman-Filterung, durch den deterministischen Term bei der Kalman-Filterung beschrieben, da gemäß der Erfindung die Übergangsmatrix, die mit einem mechanischen Modell der Schleppantenne ermittelt wird, das deterministische dynamische Verhalten beschreibt. Die bei der üblichen Kalman-Filterung zeitinvariante Übergangsmatrix wird also gemäß der Erfindung wiederholt aktualisiert.

10 Aufgrund eines beliebig wählbaren mechanischen Modells sind dank der Erfindung beliebige Zugpunktbewegungen und physikalische Eigenschaften der Schleppantenne möglich. Zudem kann der Zugpunkt der Schleppantenne an einer beliebigen Position angenommen werden, wobei trotz alledem eine Kalman-Filterung angesetzt werden kann.

15 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform werden mit der Kalman-Filterung kalmanbasierte Zustandsvektoren periodisch ermittelt. Hierbei weist der zu einem aktuellen Zeitpunkt der vordefinierten Zeitpunkte aktuelle kalmanbasierte Zustandsvektor geschätzte Werte der aktuellen Positionen, Ausrichtungen und/oder Formen mehrerer oder aller der Segmente oder aus den Werten abgeleitete Werte auf.

20 Dank der kalmanbasierten Zustandsvektoren, aus denen sich direkt Positionen, Ausrichtungen und/oder Formen von Segmenten der Schleppantenne ermitteln lassen, ist eine einfache Schätzung der aktuellen Form der Schleppantenne möglich.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform wird bei der Kalman-Filterung ein aktueller kalmanbasierter Zustandsvektor mit einem Prädiktionsschritt und einem auf den Prädiktionsschritt folgenden Korrekturschritt ermittelt. Hierbei wird im Prädiktionsschritt zunächst ein aktueller unkorrigierter kalmanbasierter Zustandsvektor ermittelt, indem ein oder mehrere vorher bestimmte kalmanbasierte Zustandsvektoren mit der Übergangsmatrix multipliziert

werden. Daraufhin wird der aktuelle unkorrigierte kalmanbasierte Zustandsvektor im Korrekturschritt in den aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektor überführt.

5 Durch Multiplikation des oder der kalmanbasierten Zustandsvektoren, die vor dem jeweiligen aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektor bestimmt wurden, mit der Übergangsmatrix, die mittels dem mechanischen Modell der Schleppantenne ermittelt wurde, wird im Prädiktionsschritt ein Ergebnis für die geschätzte Form der Schleppantenne geliefert, das bereits das deterministische dynamische Verhalten der Schleppantenne berücksichtigt und daher eine Grundlage für eine
10 Verbesserung im Korrekturschritt bietet.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform weist eines oder weisen mehrere der Segmente jeweils einen oder mehrere Sensoren auf. Die Sensoren dienen zur Ermittlung von Messwerten der Messgrößen Position, Ausrichtung
15 und/oder Form des jeweiligen Segments und zur Ausgabe der ermittelten Messwerte. Die Messwerte der gleichen Messgröße im aktuellen Zeitpunkt der definierten Zeitpunkte werden bei der Ausgabe in einem aktuellen Messvektor dieser Messgröße dargestellt. Im Korrekturschritt der Kalman-Filterung wird dann der aktuelle kalmanbasierte Zustandsvektor ermittelt, indem die Differenz zwischen
20 dem oder den aktuellen Messvektoren einer oder mehrere Messgrößen und dem aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektor ermittelt und durch Multiplikation mit einer aktuellen Kalman-Matrix gewichtet wird. Das Produkt wird durch Addition mit dem aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektor in den aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektor überführt.

25

Dank der Messwerte der Sensoren, die im Korrekturschritt der Kalman-Filterung verwendet werden, wird eine Korrektur des unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektors möglich.

30 Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform wird die aktuelle Kalman-Matrix mit der aktuellen Kovarianzmatrix des Schätzfehlers des aktuellen unkorrigierten kalmanbasierter Zustandsvektors ermittelt. Hierbei wird die Kovarianzmatrix des Schätzfehlers des aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten

Zustandsvektors mit der aktuellen Übergangsmatrix und der Kovarianzmatrix des Schätzfehlers des zeitlich vorher ermittelten kalmanbasierten Zustandsvektors ermittelt.

- 5 Durch die Ermittlung der aktuellen Kalman-Matrix mit den Kovarianzmatrizen geht ein Unsicherheitsmaß der zuvor ermittelten kalmanbasierten Zustandsvektoren in die Kalman-Matrix ein, um bei Ermittlung des aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektors möglichst realistische Vorraussetzungen zu berücksichtigen.
- 10 Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform werden Störungen der Sensoren mit dadurch fehlerbehafteten Messwerten der Sensoren angenommen. Für die Messwerte wird daher zudem eine Kovarianzmatrix des Fehlers dieser Messwerte einmalig zu Beginn der Schätzung oder regelmäßig neu ermittelt. Diese Kovarianzmatrix wird zusätzlich bei der Ermittlung der Kalman-Matrix be-
- 15 rücksichtigt.

- Durch die Ermittlung und Berücksichtigung der Kovarianzmatrix des Fehlers der Messwerte der Sensoren geht ein Unsicherheitsmaß der Messwerte in die Kalman-Matrix ein, um die Ermittlung des aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektors zu verbessern.
- 20

- Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform werden die Messwerte der Sensoren geglättet. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass weniger stark streuende Messwerte zu entsprechend weniger stark streuenden Ergebnissen der Kalman-Filterung führen.
- 25

- Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform wird eine Kovarianzmatrix eines angenommenen additiven Prozessrauschens zu Beginn der Formschätzung einmalig oder regelmäßig, z.B. in vordefinierten Intervallen, bestimmt und zur Bestimmung der Kovarianzmatrix des Schätzfehlers des jeweiligen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektors herangezogen.
- 30

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform wird zu Beginn der Schätzung der Form ein erster kalmanbasierter Zustandsvektor zur Bestimmung darauffolgender kalmanbasierter Zustandsvektoren und ein erster modellbasierter Zustandsvektor zur Bestimmung darauffolgender modellbasierter Zustandsvektoren anhand einer vermuteten Form der Schleppantenne ermittelt. Es wird also von einer Form der Schleppantenne, insbesondere einer geradlinigen Form nach Geradeausfahrt des die Schleppantenne schleppenden Fahrzeugs, ausgegangen, die vermuteter Weise der realen Form entspricht, diese Form wird durch den ersten kalmanbasierten Zustandsvektor und den ersten modellbasierten Zustandsvektor dargestellt und auf diese ersten Zustandsvektoren die weiterer Formschätzung gestützt.

Dank der Darstellung der vermuteten Form der Schleppantenne durch den ersten kalmanbasierten Zustandsvektor und den ersten modellbasierten Zustandsvektor ist eine Initialisierung der Formschätzung möglich.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform berücksichtigt das mechanische Modell der Schleppantenne ein Feder-Masse-System. Bei dem Feder-Masse-System werden ein oder mehrere Punkte, z.B. Schwerpunkte oder beliebige andere Punkte, jeweils für jedes Segment der Schleppantenne als Masse definiert. Benachbarte Massen werden als durch Federn mit vordefinierten Federkonstanten, also elastisch, miteinander verbunden betrachtet. Das geschätzte zeitliche Verhalten des mechanischen Modells der Schleppantenne wird dann durch Beschleunigungen der Massen ermittelt, die durch Federkräfte sowie durch äußere Kräfteeinwirkungen auf das Feder-Masse-System erzeugt werden. Äußere Kräfteeinwirkungen sind z.B. hydrodynamische Kräfte, durch verdrängte Flüssigkeit verursachte Gegenkräfte sowie statische Auftriebskräfte.

Vorteilhafterweise können durch ein derartiges mechanisches Modell beliebige physikalische Eigenschaften der Schleppantenne in einfacher Weise berücksichtigt werden.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform werden zyklische Werte der modellbasierten Zustandsvektoren, wie z.B. Kompasswerte, die die geschätzten Ausrichtungen der Segmente angeben, vor der Überführung in die Übergangsmatrix in äquivalente lineare Werte umgewandelt. Ferner werden zyklische Messwerte der Messvektoren vor der Bestimmung der Abweichung zwischen dem Messvektor und dem aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektor in äquivalente lineare Messwerte umgewandelt. Eine Umwandlung ist, z.B. im Falle von in den Zustands- bzw. Messvektoren enthaltenen Kompasswerten der Segmente, dadurch möglich, dass die Werte einzeln einer modifizierten Modulo-berechnung unterzogen werden.

Dadurch ist es möglich, dass in dem Falle, dass sich innerhalb eines Zeitschritts ein Wert im Zustands- oder Messvektor über seine zyklische Grenze hinwegbewegt, dies nicht zu sehr großen Differenzbeträgen, z.B. in der Übergangsmatrix oder im aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektor, führt. Diese großen Differenzbeträge würden nämlich zu fehlerbehafteten kalmanbasierten Zustandsvektoren führen und die Formschätzung verfälschen.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist der zeitliche Abstand zwischen den vordefinierten Zeitpunkten kürzer als der zeitliche Abstand zwischen den Zeitpunkten, in denen die Position des Zugpunktes ermittelt wird. Ferner werden dann aktuelle Positionen des Zugpunktes, die zeitlich zwischen den ermittelten Zeitpunkten liegen, durch Interpolation ermittelt.

Hierdurch ergibt sich der Vorteil, dass die Position des Zugpunktes nicht zu jedem Zeitpunkt der definierten Zeitpunkte aktuell ermittelt werden muss, sondern dass eine Ermittlung der Position des Zugpunktes auch mit einer geringeren Wiederholfrequenz bzw. Periode möglich ist.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform werden kalmanbasierte Zustandsvektoren mit einer geringeren Wiederholrate ermittelt als modellbasierte Zustandsvektoren.

Hierdurch kann Rechenaufwand und damit elektrischer Energieaufwand bei der Durchführung des Verfahrens bzw. der erfindungsgemäßen Vorrichtung eingespart werden.

5 Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform weisen die Messvektoren, die modellbasierten Zustandsvektoren und die kalmanbasierten Zustandsvektoren nur diskrete Werte geschätzter Positionen, Ausrichtungen und/oder Formen oder diskrete aus diesen Werten abgeleitete Werte auf. Diese Wertdiskretisierung der Zustands- und Messgrößen ergibt sich z.B. durch eine
10 räumliche Diskretisierung des zu betrachtenden Raumes, in dem die Form der Schleppantenne geschätzt werden soll. Abgeleitete Werte entsprechen hier Werten, die durch mathematische Methoden, wie z.B. durch Multiplikation mit Konstanten oder Moduloberechnung, von den tatsächlichen Werten der geschätzten Positionen, Ausrichtungen und/oder Formen abgeleitet sind.

15 Durch Diskretisierung der Werte lässt sich weiterer Rechenaufwand und damit elektrischer Energieaufwand bei der Durchführung des Verfahrens bzw. der erfindungsgemäßen Vorrichtung einsparen, da eine digitale Bearbeitung möglich ist.

20 Weitere Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen sowie aus den anhand der Zeichnung näher erläuterten Ausführungsbeispielen. In der Zeichnung zeigen:

25 Fig. 1 Draufsicht auf ein Wasserfahrzeug mit einer Schleppantenne,

Fig. 2 ein mechanisches Modell der Schleppantenne aus Fig. 1,

Fig. 3 einen Ablauf der Kalman-Filterung und

30 Fig. 4 den Ablauf eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Fig. 1 zeigt die Draufsicht auf ein Wasserfahrzeug 10 mit einer Schleppantenne 12. Die Schleppantenne 12 umfasst ein Zugseil 14, das an einer Schnittstelle 16, die als Zugpunkt 16 definiert ist, am Wasserfahrzeug 10 befestigt ist. Am gegenüberliegenden Ende des Zugpunktes 16 ist eine Akustiksektion 18 mit dem
 5 Zugseil 14 verbunden. Am Ende weist die Schleppantenne ein Endstück 20 auf. Ferner kann eine reale Schleppantenne noch weitere Sektionen, wie z.B. Schwingungsdämpfer zwischen dem Zugseil 14 und der Akustiksektion 18 sowie zwischen der Akustiksektion 18 und dem Endstück 20, aufweisen, die zur besseren Übersicht allerdings nicht dargestellt sind. Die Schleppantenne wird nun als
 10 in Segmente 22 eingeteilt angenommen. In Fig. 1 ist eine Einteilung der Schleppantenne 12 in Segmente 22a bis 22i vorgenommen worden, wobei jede beliebig gröbere oder feinere Einteilung der Schleppantenne 12 möglich ist.

Fig. 2 zeigt ein mechanisches Modell 24 der Schleppantenne 12 aus Fig. 1. Das
 15 mechanische Modell 24 weist den Zugpunkt 16 sowie die Massen m_1 bis m_9 auf, die durch Federelemente bzw. Federn 28a bis 28i elastisch verbunden sind. Die Massen m_1 bis m_9 sind abhängig vom Segment, das durch die jeweilige Masse modelliert wird, gleich oder unterschiedlich groß. Ferner sind auch die Federkonstanten der Federn 28a bis 28i abhängig vom Segment, das durch die
 20 jeweilige Feder modelliert wird, gleich oder unterschiedlich groß. Geht man z.B. davon aus, dass die Akustiksektion 18 aufgrund ihres Aufbaus eine höhere Elastizität in Längsrichtung als das Zugseil 14 aufweist, ergeben sich allein hierdurch unterschiedliche Federkonstanten der Federn, wegen denen die Segmente 22 dieser beiden unterschiedlichen Sektionen der Schleppantenne 12 unterschied-
 25 lich modelliert werden müssen.

Allgemein wird im Folgenden von n Massen m ausgegangen, die n Segmente 22 beschreiben. Die n -te Masse m_n des n -ten Segments 22 des mechanischen Modells 24 wird dann z.B. durch die Formel

$$30 \quad m_n = \rho_n l_n \pi \frac{d_n^2}{4}$$

ermittelt, wobei ρ_n die Dichte des n -ten Segments 22, l_n die Länge des n -ten Segments 22 und d_n den Durchmesser des n -ten Segments 22 beschreibt.

Geht man nun von Kräften aus, die auf die Masse m_n wirken und die zusammengefasst als Gesamtkraft $F_{n,ges}$ bezeichnet werden, so kann mit der Formel

$$\frac{F_{n,ges}}{m_n} = a_n$$

die Beschleunigung a_n der Masse m_n bestimmt werden. Die Gesamtkraft $F_{n,ges}$ setzt sich aus beliebigen im mechanischen Modell 24 zu berücksichtigenden Kräfte zusammen, die auf die jeweilige modellierte Schleppantenne 12 wirken. Wichtigste hierbei zu berücksichtigende Kraft ist die Zugkraft 32 des Zugpunktes 16. Weitere Kräfte sind z.B. die Gewichtskräfte der Segmente und die Zugkräfte 30a, 30b, die durch Beschleunigung eines benachbarten Segments 22 auf ein Segment 22 wirken. Ferner werden z.B. die Auftriebskräfte der Segmente 22 und die Gegenkräfte, die auf die Segmente 22 wirken, wenn diese bei der Bewegung durch ein Gewässer Wasser verdrängen, berücksichtigt.

Ferner werden die Massen m des mechanischen Modells 24 in einem Zeitpunkt k_0 durch eine bekannte Position $r_n(k_0)$ und eine bekannte Geschwindigkeit $v_n(k_0)$ der Massen m initialisiert. Außerdem werden zusätzlich auf den Zeitpunkt k_0 folgende Zeitpunkte k_i vordefiniert, wobei zeitlich aufeinanderfolgende Zeitpunkte einen zeitlichen Abstand Δt aufweisen. Damit wird dann die Geschwindigkeit $v_n(k_1)$ der Masse m_n des n -ten Segments 22 zum Zeitpunkt k_1 durch

$$v_n(k_1) = v_n(k_0) + a_n(k_0) \cdot \Delta t$$

ermittelt. Mit der ermittelten Geschwindigkeit $v_n(k_1)$ kann dann die Geschwindigkeit $v_n(k_2)$ im darauffolgenden Zeitpunkt und entsprechend die weiteren Geschwindigkeiten für weitere Zeitpunkte k_i bestimmt werden.

Ferner wird anhand der ermittelten Geschwindigkeit $v_n(k_1)$ im Zeitpunkt k_1 und der zum vorhergehenden Zeitpunkt k_0 bekannten Position $r_{n,0}(k_0)$ die Position der Masse m_n des n -ten Segments 22 im Zeitpunkt k_1 durch

$$r_n(k_1) = r_n(k_0) + v_n(k_1) \cdot \Delta t$$

ermittelt. Mit der ermittelten Position $r_n(k_1)$ kann dann die Position $r_n(k_2)$ im darauffolgenden Zeitpunkt und entsprechend die weiteren Positionen für weitere Zeitpunkte k_i bestimmt werden. Die Positionen $r_n(k)$ entsprechen z.B. absoluten Koordinaten oder Vektoren zur jeweiligen Masse m_n ausgehend von einem für alle Massen gewählten beliebigen Referenzpunkt.

Die o.g. Gleichungen beschreiben die Aktualisierung des Bewegungszustandes des mechanischen Modells 24 der Schleppantenne 12 unter Verwendung eines expliziten Integrationsansatzes. Hierbei handelt es sich um ein Ausführungsbeispiel, wobei die Ermittlung von Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und/oder Orts- bzw. Positionsvektoren nicht auf diese Methode beschränkt ist. Insbesondere sind auch implizite Integrationsverfahren möglich, deren Aktualisierungsvorschriften zwar aufwendiger und weniger intuitiv sind, die in der Umsetzung aber dafür Geschwindigkeitsvorteile erzielen.

Mit dem mechanischen Modell 24 wird so zu jedem Zeitpunkt k_i die Position der Massen m_n und damit der Segmente 22 bestimmt. Die Positionen der Massen m_n werden dann in einem modellbasierten Zustandsvektor x jeweils für jeden der Zeitpunkte k_i dargestellt. Der modellbasierte Zustandsvektor $x(k_1)$ für die Zeitpunkte k_i des in Fig. 1 dargestellten Modells mit den Massen m_1 bis m_9 , entspricht dann

$$x(k_i) = \begin{bmatrix} r_{m1}(k_i) \\ r_{m2}(k_i) \\ \dots \\ \dots \\ r_{m9}(k_i) \end{bmatrix}.$$

Die Abweichung eines aktuellen modellbasierten Zustandsvektors $x(k_i)$, also des Zustandsvektors $x(k_i)$ des aktuellen Zeitpunktes, zum vorhergehenden modellbasierten Zustandsvektor $x(k_{i-1})$, also des vorhergehenden Zeitpunktes, wird dann in eine aktuelle Matrix $\tilde{F}(k_i)$ des aktuellen Zeitpunktes k_i überführt, sodass die Gleichung

$$x(k_i) = \tilde{F}(k_i) \cdot x(k_{i-1})$$

erfüllt ist. Die aktuelle Matrix $\tilde{F}(k_i)$, also die Matrix $\tilde{F}(k_i)$ des aktuellen Zeitpunktes, ist somit für jeden der Zeitpunkte k_i bestimmbar.

Fig. 3 zeigt zum besseren Verständnis der Erfindung den bekannten Ablauf der Kalman-Filterung zur Schätzung der Form einer Schleppantenne 12. Die Kalman-Filterung besteht aus mehreren Gleichungen, die dazu dienen, Messwerte von in einem oder mehreren der Segmente 22 angeordneten Sensoren, die zur Ermittlung von Messwerten der Messgrößen Position, Ausrichtung und/oder Form des jeweiligen Segments dienen, bei der Formschätzung zu berücksichtigen. Ferner ist durch die Kalman-Filterung ein Entfernen bzw. Reduzieren von Störungen der Sensoren möglich.

Bei der Kalman-Filterung werden dazu Zustandsvektoren $\hat{x}$ für einen aktuellen Zeitpunkt k_i geschätzt. Um eine Verwechslung mit den o.g. modellbasierten Zustandsvektoren x zu vermeiden, werden vorliegend die Zustandsvektoren $\hat{x}$, die bei der Kalman-Filterung verwendet werden, kalmanbasierte Zustandsvektoren $\hat{x}$ genannt. Die kalmanbasierten Zustandsvektoren $\hat{x}$ sind jedoch mit den modellbasierten Zustandsvektoren x zu vergleichen, da auch ein kalmanbasierter Zustandsvektor $\hat{x}$ in einem Zeitpunkt k , für den der jeweilige kalmanbasierte Zustandsvektor $\hat{x}$ bestimmt wurde, die geschätzte Form der Schleppantenne 12 beschreibt.

Ein aktueller kalmanbasierter Zustandsvektor $\hat{x}(k_i)$ eines beliebigen aktuellen Zeitpunktes k_i wird bei der Kalman-Filterung in zwei Schritten aus einem kalmanbasierter Zustandsvektor $\hat{x}(k_{i-1})$ des dem aktuellen Zeitpunkt k_i vorhergehenden Zeitpunktes k_{i-1} ermittelt. Der erste dieser beiden Schritte wird Prädiktionsschritt 34 und der zweite dieser Schritte wird Korrekturschritt 36 genannt.
 5 Diese beiden Schritte werden iterativ wiederholt.

Im Prädiktionsschritt 34 - gemäß Schritt 38 - wird zunächst ein unkorrigierter kalmanbasierter Zustandsvektor $\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)$, der auch "a priori" Zustandsvektor genannt wird, mit der Zustandsgleichung der Kalman-Filterung
 10

$$\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i) = F(k_i) \cdot \hat{x}(k_{i-1}) + u(k_i)$$

ermittelt. Der aktuelle unkorrigierte kalmanbasierte Zustandsvektor $\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)$ wird
 15 hier durch eine Multiplikation des kalmanbasierten Zustandsvektors $\hat{x}(k_{i-1})$, der in dem dem aktuellen Zeitpunkt vorhergehenden Zeitpunkt bestimmten wurde, mit einer aktuellen Übergangsmatrix $F(k_i)$ erhalten. Der im vorhergehenden Zeitpunkt bestimmte kalmanbasierter Zustandsvektor $\hat{x}(k_{i-1})$ wurde für diese Ermittlung - gemäß Schritt 40 - in einem vorhergehenden Iterationsschritt abgespeichert. Der Term $u(k)$, der den deterministischen Anteil der Zustandsgleichung des Kalman-Filters beschreibt, ist hier zwar dargestellt, wobei dieser nicht weiter erläutert wird, da dieser später gemäß der Erfindung zu Null gesetzt wird. Ferner wird im Prädiktionsschritt 34 bei der Kalman-Filterung die Kovarianzmatrix des Schätzfehlers des aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektors
 20 $\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)$ - gemäß Schritt 42 - mit

$$\hat{P}_{\tilde{a}}(k_i) = F(k_i) \cdot \hat{P}(k_{i-1}) \cdot F^T(k_i) + Q$$

ermittelt. $F^T(k_i)$ ist hierbei die transponierte aktuelle Übergangsmatrix $F(k_i)$
 30 und $\hat{P}(k_{i-1})$ ist die Kovarianzmatrix des Schätzfehlers des kalmanbasierten Zu-

standsvektors $\hat{x}(k_{i-1})$, der im Zeitpunkt k_{i-1} vor dem aktuellen Zeitpunkt k_i ermittelt wurde. Diese Kovarianzmatrix $\hat{P}(k_{i-1})$ wird jeweils, wie weiter unten beschrieben, am Ende des jeweiligen Korrekturschritts 36 für einen aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektor $\hat{x}$ zur Verwendung im darauffolgenden Iterationsschritt ermittelt und abgespeichert - Schritt 44.

Ferner wird eine Kovarianzmatrix Q eines Prozessrauschens berücksichtigt, um die bislang idealisierten Annahmen durch eine Fehlermodellierung an die realen Bedingungen anzugleichen. Diese Kovarianzmatrix Q wurde für ein hier angenommenes Prozessrauschen vorbestimmt - Schritt 46.

Im Korrekturschritt 36 werden nun Sensordaten bzw. Sensordaten der Sensoren der Segmente 22 der Schleppantenne 12 betrachtet. Wie bereits oben erläutert, weist ein bzw. weisen mehrere der Segmente jeweils einen oder mehrere Sensoren zur Ermittlung von Messwerten $\mathcal{Y}$ der Messgrößen Position, Ausrichtung und/oder Form des jeweiligen Segments 22 auf. Die Messwerte $\mathcal{Y}$ der gleichen Messgröße werden dann zum gleichen Zeitpunkt k_i in einem Messvektor $z(k_i)$ dargestellt - Schritt 48. Beispielhaft wird hier davon ausgegangen, dass jedes Segment 22 der Schleppantenne 12 genau einen Sensor aufweist. Jeder Sensor nimmt Messwerte $\mathcal{Y}$, hier beispielhaft Kompasswerte $\mathcal{Y}$, also die Ausrichtung des jeweiligen Segments 22 zum Erdmagnetfeld, auf. Werden die Segmente 22 aus Fig. 1 betrachtet und die Messwerte der Segmente 22 durch die Indizes 1 bis 9 indiziert, so ist ein Messvektor $z(k_i)$ eines aktuellen Zeitpunktes k_i durch

$$z(k_i) = \begin{bmatrix} \mathcal{Y}_1(k) \\ \mathcal{Y}_2(k) \\ \dots \\ \dots \\ \mathcal{Y}_9(k) \end{bmatrix}.$$

darstellbar. Dieser aktuelle Messvektor $z(k_i)$ wird nun im Korrekturschritt 36 zur Korrektur des aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektors $\hat{x}_a(k_i)$

genutzt. Zur Korrektur 50 des aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektors $\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)$ wird die Differenz zwischen dem Messvektor $z(k_i)$ und dem aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektor $\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)$ ermittelt. Diese Differenz wird durch Multiplikation mit einer aktuellen Kalman-Matrix $\hat{K}(k_i)$ gewichtet. Das gewichtete Ergebnis wird dann zum aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektor $\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)$ hinzuaddiert. Die Korrektur erfolgt also durch

$$\hat{x}(k_i) = \hat{x}_{\tilde{a}}(k_i) + \hat{K}(k_i) \cdot (z(k_i) - H \cdot \hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)),$$

10

wodurch der aktuelle kalmanbasierte Zustandsvektor $\hat{x}(k_i)$ erhalten wird. Hier bezeichnet H eine bei der Kalman-Filterung als Beobachtungsmatrix oder Messmatrix bezeichnete Matrix. Diese Messmatrix H dient zur Abbildung der Zustandsgrößen aus dem kalmanbasierten Zustandsvektor $\hat{x}(k_i)$ auf die mit den Sensoren erfassten Messgrößen. Für das o.g. Beispiel mit jeweils einem Sensor pro Segment würde die Messmatrix H der Einheitsmatrix entsprechen.

15

Die oben im Korrekturschritt 36 benutzte aktuelle Kalman-Matrix $\hat{K}(k_i)$ bestimmt sich nach

20

$$\hat{K}(k_i) = \hat{P}_{\tilde{a}}(k_i) \cdot H^T (H \cdot \hat{P}_{\tilde{a}}(k_i) \cdot H^T + R)^{-1}$$

und wird vor der Ermittlung des aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektors $\hat{x}(k_i)$ ermittelt - Schritt 52. Die Matrix R entspricht hier einer Kovarianzmatrix, die für angenommene Messfehler der Sensoren vorbestimmt – gemäß Schritt 54 - wurde. H^T ist die transponierte Messmatrix H.

25

Nach der Ermittlung - gemäß Schritt 50 - des aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektors $\hat{x}(k_i)$ wird noch die Kovarianzmatrix $\hat{P}(k_i)$ des Schätzfehlers dieses kalmanbasierten Zustandsvektors durch

30

$$\hat{P}(k_i) = \hat{P}_{\hat{a}}(k_i) - \hat{K}(k_i) \cdot (H \cdot \hat{P}_{\hat{a}}(k_i) \cdot H^T + R) \cdot \hat{K}^T(k_i)$$

- 5 ermittelt 56. Diese Kovarianzmatrix wird, wie bereits oben beschrieben, zur Ermittlung des folgenden kalmanbasierten Zustandsvektors $\hat{x}(k_{i+1})$, der im nächsten Iterationsschritt nach dem aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektor $\hat{x}(k_i)$ ermittelt wird, gespeichert - gemäß Schritt 44.
- 10 Zusammenfassend werden also, gemäß der Darstellung in Fig. 3, ein aktueller unkorrigierter kalmanbasierter Zustandsvektor $\hat{x}_{\hat{a}}(k_i)$ - gemäß Schritt 38 - ermittelt. Ferner wird die Kovarianzmatrix Q eines angenommenen Prozessrauschens - gemäß Schritt 46 - vorbestimmt. Daraufhin wird die Kovarianzmatrix des Schätzfehlers des aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektors
- 15 $\hat{x}_{\hat{a}}(k_i)$ - gemäß Schritt 42 - ermittelt. Ferner wird die Kovarianzmatrix R durch angenommene Messfehler der Sensoren - gemäß Schritt 54 - vorbestimmt und die Kalman-Matrix - gemäß Schritt 52 - ermittelt. Die Messwerte y der Sensoren werden als Messvektor $z(k_i)$ - gemäß Schritt 48 - dargestellt und mit dem Messvektor $z(k_i)$ und der Kalman-Matrix $\hat{K}(k_i)$ der aktuelle kalmanbasierten Zustandsvektors $\hat{x}(k_i)$ - gemäß Schritt 50 - ermittelt. Der aktuelle kalmanbasierten Zustandsvektors $\hat{x}(k_i)$ wird dann - gemäß Schritt 40 - abgespeichert und die Kovarianzmatrix $\hat{P}(k_i)$ seines Schätzfehlers für den darauffolgenden Iterationsschritt - gemäß Schritt 56 - bestimmt.
- 25 Fig. 4 zeigt den Ablauf eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens. Bei dem Verfahren wird zunächst ein mechanisches Modell 24 ausgewählt oder - gemäß Schritt 60 - bestimmt, das die Schleppantenne 12, deren Form geschätzt werden soll, hinreichend genau abbildet. Ein derartiges Modell wurde in Fig. 2 dargestellt. Dann wird die Bewegung des Zugpunktes 16 bestimmt - gemäß Schritt 62 - und aus der Zugpunktbewegung und dem mechanischen Modell 24 ein aktueller modellbasierter Zustandsvektor $x(k_i)$ eines aktuel-
- 30

len Zeitpunktes k_i , wie in der Beschreibung zu Fig. 2 dargestellt, ermittelt - Schritt 64. Ist der aktuelle Zeitpunkt k_i ein erster zu betrachtender Zeitpunkt k_0 , so wird der ermittelte aktuelle modellbasierte Zustandsvektor $x(k_0)$ lediglich - gemäß Schritt 66 - gespeichert und das Verfahren geht in den nächsten Iterationsschritt über. Geht man von einem aktuellen Zeitpunkt k_i aus, der nicht dem Zeitpunkt k_0 entspricht, so wird mit dem aktuellen modellbasierten Zustandsvektor $x(k_i)$ und einem im vorhergehenden Iterationsschritt zuvor gespeicherten modellbasierten Zustandsvektor $x(k_{i-1})$ eine aktuelle Matrix $\tilde{F}(k_i)$ bestimmt bzw. - gemäß Schritt 68 - geschätzt.

10

Die aktuelle Matrix $\tilde{F}(k_i)$ wird dann in die Übergangsmatrix $F(k_i)$ - gemäß Schritt 70 - überführt. Eine Überführung - gemäß Schritt 70 - ist hier nötig, wenn die Werte der bei der folgenden Kalman-Filterung betrachteten kalmanbasierten Zustandsvektoren $\hat{x}(k_i)$ und Messvektoren $z(k_i)$ zu den modellierten Zustandsvektoren $x(k_i)$ unterschiedliche Messgrößen beschreiben. Ein Beispiel hierfür wäre, wenn etwa die kalmanbasierten Zustandsvektoren $\hat{x}(k_i)$ und Messvektoren $z(k_i)$ die Ausrichtungen mehrerer oder aller der Segmente beschreiben, während die Werte der modellbasierten Zustandsvektoren $x(k_i)$ die absoluten Positionen mehrerer oder aller der Segmente beschreiben. Bei diesem Beispiel müsste z.B. die Form der Schleppantenne anhand der bekannten Positionen der Segmente ermittelt und sich daraus ergebende Kompasswerte, also die Ausrichtungen, der Segmente bei einer derartigen Form bestimmt werden. Hiermit kann dann die aktuelle Matrix $\tilde{F}(k_i)$ in eine aktuelle Übergangsmatrix $F(k_i)$ - gemäß Schritt 70 - überführt werden.

25

Im nächsten Schritt werden dann Messwerte von Sensoren der Schleppantenne 12, z.B. von Tiefensensoren oder Kompassen, aufgenommen - Schritt 72. Für einen aktuellen Zeitpunkt k_i wird dann mit einer Kalman-Filterung ein aktueller kalmanbasierter Zustandsvektor $\hat{x}(k_i)$ - gemäß Schritt 74 - bestimmt. Hierfür wird die aus dem mechanischen Modell 24 erhaltene aktuelle Übergangsmatrix

30

$F(k_i)$, der aus den Messwerten der Sensoren erhaltene aktuelle Messvektore $z(k_i)$ und ein gespeicherter kalmanbasierter Zustandsvektor $\hat{x}(k_{i-1})$ des Zeitpunktes k_{i-1} , der vor dem aktuellen Zeitpunkt k_i ermittelt wurde, herangezogen. Nach der Bestimmung des aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektors $\hat{x}(k_i)$ wird
5 dieser für die Ermittlung des zeitlich folgenden Zustandsvektors $\hat{x}(k_{i+1})$ des folgenden Zeitpunktes k_{i+1} - gemäß Schritt 76 - gespeichert. Aus den Werten des aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektors $\hat{x}(k_i)$, die z.B. die aktuellen Positionen, Ausrichtungen und/oder Formen mehrerer oder aller der Segmente 22 beschreiben, wird dann die aktuelle Form der Schleppantenne 12 - gemäß Schritt
10 78 - geschätzt.

Somit ist eine Schätzung der Form einer Schleppantenne 12 mit einer Kalman-Filterung möglich, da die mit einem mechanischen Modell 24 bestimmte Übergangsmatrix $F(k_i)$ wiederholt aktualisiert wird und daher beliebige, auch inho-
15 mogene, physikalische Eigenschaften der Segmente der Schleppantenne betrachtbar sind. Zudem kann der Zugpunkt der Schleppantenne an einer beliebigen Position und eine beliebige zeitliche Bewegung der Schleppantenne angenommen werden.

20 Alle in der vorstehenden Beschreibung und in den Ansprüchen genannten Merkmale sind sowohl einzeln als auch in beliebiger Kombination miteinander einsetzbar. Die Offenbarung der Erfindung ist daher nicht auf die beschriebene bzw. beanspruchte Merkmalskombination beschränkt. Vielmehr sind alle Merkmalskombinationen als offenbart zu betrachten.

Ansprüche

1. Verfahren zum Schätzen der Form einer akustischen Schleppantenne (12),
wobei die Form mit einer Kalman-Filterung geschätzt wird,
5 dadurch gekennzeichnet, dass
der deterministische Anteil ($u(k_i)$) der Zustandsgleichung des Kalman-
Filters zu Null gesetzt wird, aufeinanderfolgende diskrete Zeitpunkte (k_i)
vordefiniert werden und in den vordefinierten Zeitpunkten (k_i) jeweils eine
geschätzte Form der Schleppantenne (12) durch einen modellbasierten
10 Zustandsvektor ($x(k_i)$) beschrieben wird, wobei die modellbasierten Zu-
standsvektoren ($x(k_i)$) durch das geschätzte zeitliche Verhalten eines me-
chanischen Modells (24) der Schleppantenne (12) und durch als bekannt
vorausgesetzte Bewegungen eines Zugpunktes (16) der Schleppantenne
(12) ermittelt werden, die Abweichung des aktuellen modellbasierten Zu-
15 standsvektors ($x(k_i)$) zu einem oder mehreren vorhergehenden modellba-
sierten Zustandsvektoren ($x(k_{i-1})$) bestimmt und als eine aktuelle Matrix
($\tilde{F}(k_i)$) betrachtet wird und die aktuelle Übergangsmatrix ($F(k_i)$) für die
Kalman-Filterung mit den ermittelten Matrizen ($\tilde{F}(k_i)$) periodisch aktuali-
siert wird.
20
2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Schleppantenne (12) als in mehrere Segmente (22) eingeteilt ange-
nommen wird und mit der Kalman-Filterung kalmanbasierte Zustandsvektoren
25 ($\hat{x}(k_i)$) periodisch ermittelt werden, wobei jeder kalmanbasierte Zu-
standsvektor ($\hat{x}(k_i)$) jeweils mit der Kalman-Filterung geschätzte Werte
aufweist, die aktuelle Positionen, Ausrichtungen und/oder Formen mehrerer
oder aller der Segmente (22) beschreiben.
- 30 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, dass

bei der Kalman-Filterung ein aktueller kalmanbasierter Zustandsvektor ($\hat{x}(k_i)$) mit einem Prädiktionsschritt (34) und einem auf den Prädiktionsschritt (34) folgenden Korrekturschritt (36) ermittelt wird, wobei im Prädiktionsschritt (34) ein aktueller unkorrigierter kalmanbasierter Zustandsvektor ($\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)$) durch Multiplikation eines oder mehreren vorher bestimmter kalmanbasierter Zustandsvektoren ($\hat{x}(k_{i-1})$) mit der Übergangsmatrix ($F(k_i)$) ermittelt wird und der aktuelle unkorrigierte kalmanbasierte Zustandsvektor ($\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)$) im Korrekturschritt (36) in den aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektor ($\hat{x}(k_i)$) überführt wird.

10

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass
eines oder mehrere der Segmente (22) jeweils einen oder mehrere Sensoren zur Ermittlung von Messwerten (y) der Messgrößen Position, Ausrichtung und/oder Form des jeweiligen Segments (22) aufweisen, wobei die
Messwerte (y) der gleichen Messgröße zum gleichen Zeitpunkt (k_i) in einem Messvektor ($z(k_i)$) dargestellt werden, und im Korrekturschritt (36) der aktuelle kalmanbasierte Zustandsvektor ($\hat{x}(k_i)$) ermittelt wird, indem die Differenz zwischen dem Messvektor ($z(k_i)$) und dem aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektor ($\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)$) ermittelt, durch
Multiplikation mit der aktuellen Kalman-Matrix ($F(k_i)$) gewichtet und das Produkt durch Addition mit dem aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektor ($\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)$) in den aktuellen kalmanbasierten Zustandsvektor ($\hat{x}(k_i)$) überführt wird.

25

5. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
die aktuelle Kalman-Matrix ($\hat{K}(k_i)$) mit der Kovarianzmatrix des Schätzfehlers ($\hat{P}_{\tilde{a}}(k_i)$) des aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektors ermittelt ($\hat{x}_{\tilde{a}}(k_i)$) wird, wobei die Kovarianzmatrix ($\hat{P}_{\tilde{a}}(k_i)$) des

30

Schätzfehlers des aktuellen unkorrigierten kalmanbasierter Zustandsvektors ($\hat{x}_{\hat{a}}(k_i)$) mit der aktuellen Übergangsmatrix ($F(k_i)$) und der Kovarianzmatrix ($\hat{P}(k_{i-1})$) des Schätzfehlers des zuvor ermittelten kalmanbasierten Zustandsvektors ($\hat{x}(k_{i-1})$) ermittelt wird.

5

6. Verfahren nach Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet, dass
Störungen der Sensoren mit dadurch fehlerbehafteten Messwerten (y) der
Sensoren angenommen werden, eine Kovarianzmatrix (R) dieser Mess-
fehler der Messwerte (y) der Sensoren zu Beginn der Schätzung einmalig
oder in vordefinierten Intervallen bestimmt wird und diese Kovarianzmatrix
(R) zur Ermittlung der Kalman-Matrix ($\hat{K}(k_i)$) herangezogen wird.

10

15

7. Verfahren nach Anspruch 6,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Messwerte der Sensoren geglättet werden.

20

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7,
dadurch gekennzeichnet, dass
eine Kovarianzmatrix (Q) eines angenommenen additiven Prozessrauschens
einmalig zu Beginn der Formschätzung oder in vordefinierten Intervallen
bestimmt wird und zur Ermittlung der Kovarianzmatrix ($\hat{P}_{\hat{a}}(k_i)$) des
Schätzfehlers des jeweiligen aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zu-
standsvektors ($\hat{x}_{\hat{a}}(k_i)$) herangezogen wird.

25

9. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
ein erster kalmanbasierter Zustandsvektor ($\hat{x}(k_0)$) zur Bestimmung darauf-
folgender kalmanbasierter Zustandsvektoren ($\hat{x}(k_i)$) und ein erster mo-
dellbasierte Zustandsvektor ($x(k_0)$) zu Bestimmung darauffolgender mo-

30

dellbasierter Zustandsvektoren ($x(k_i)$) anhand einer vermuteten Form der Schleppantenne (12) zu Beginn der Schätzung ermittelt werden.

10. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche,
5 dadurch gekennzeichnet, dass
das mechanische Modell (24) der Schleppantenne (12) ein Feder-Masse-System berücksichtigt, bei dem ein oder mehrere Punkte, z.B. Schwerpunkte oder ein oder mehrer beliebige andere Punkte, jeweils für jedes Segment (22) der Schleppantenne (12) als Masse (m) und benachbarte
10 Massen (m) als durch Federn (28) miteinander verbunden betrachtet werden und das geschätzte zeitliche Verhalten des mechanischen Modells (24) der Schleppantenne (12) durch die Beschleunigungen der Massen (m) ermittelt wird, wobei die Beschleunigungen durch die Zugkräfte (30a, 30b) der Federn (28) sowie durch äußere Kräfteeinwirkungen auf das Feder-Masse-System, insbesondere durch angenommene hydrodynamische
15 Kräfte, angenommene, durch verdrängte Flüssigkeit verursachte Gegenkräfte sowie angenommene statische Auftriebskräfte, beschrieben werden.
11. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche,
20 dadurch gekennzeichnet, dass
zyklische Werte der modellbasierten Zustandsvektoren ($x(k_i)$), wie z.B. geschätzte Kompasswerte der Segmente (22), vor der Bestimmung der aktuellen Übergangsmatrix ($F(k_i)$) sowie zyklische Messwerte (ϑ) der Messvektoren ($z(k_i)$) vor der Bestimmung der Abweichung zwischen dem
25 jeweiligen Messvektor ($z(k_i)$) und dem aktuellen unkorrigierten kalmanbasierten Zustandsvektor ($\hat{x}_{\hat{a}}(k_i)$) in äquivalente lineare Werte bzw. Messwerte (ϑ) überführt werden.
12. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche,
30 dadurch gekennzeichnet, dass
der zeitliche Abstand (Δt) zwischen den definierten Zeitpunkten (k_i) kürzer ist als der zeitliche Abstand zwischen den Zeitpunkten, in denen die

Position des Zugpunktes (16) ermittelt wird, und aktuelle Positionen des Zugpunktes (16), die zeitlich zwischen den ermittelten Zeitpunkten liegen, durch Interpolation ermittelt werden.

- 5 13. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
kalmanbasierte Zustandsvektoren ($\hat{x}(k_i)$) mit einer geringeren Wiederhol-
rate ermittelt werden als modellbasierte Zustandsvektoren ($x(k_i)$).
- 10 14. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die modellbasierten Zustandsvektoren ($x(k_i)$) und die kalmanbasierten
Zustandsvektoren ($\hat{x}(k_i)$) nur diskrete Werte geschätzter Positionen, Aus-
richtungen und/oder Formen oder aus diesen Werten abgeleitete Werte
15 aufweisen.
15. Vorrichtung zur Schätzung der Form einer akustischen Schleppantenne
(12), wobei die Vorrichtung derart ausgebildet ist, um die Form mit einem
Mittel zur Kalman-Filterung zu schätzen,
20 dadurch gekennzeichnet, dass
die Vorrichtung ferner derart ausgebildet ist, um den deterministischen An-
teil ($u(k_i)$) der Zustandsgleichung des Kalman-Filters zu Null zu setzen,
aufeinanderfolgende diskrete Zeitpunkte (k_i) vorzudefinieren und in den
vordefinierten Zeitpunkten (k_i) jeweils eine geschätzte Form der Schlepp-
25 antenne (12) durch einen modellbasierten Zustandsvektor ($x(k_i)$) zu be-
schreiben, wobei die Vorrichtung derart ausgebildet ist, um die modellba-
sierten Zustandsvektoren ($x(k_i)$) durch das geschätzte zeitliche Verhalten
eines mechanischen Modells (24) der Schleppantenne (12) und durch als
bekannt vorausgesetzte Bewegungen eines Zugpunktes (16) der Schlepp-
30 antenne (12) zu ermitteln, die Abweichung des aktuellen modellbasierten
Zustandsvektors ($x(k_i)$) zu einem oder mehreren vorhergehenden modell-
basierten Zustandsvektoren ($x(k_{i-1})$) zu bestimmen, diese Abweichungen

jeweils als eine aktuelle Matrix ($\tilde{F}(k_i)$) zu betrachten und die aktuelle Übergangsmatrix ($F(k_i)$) des Kalman-Filters mit den ermittelten Matrizen ($\tilde{F}(k_i)$) periodisch zu aktualisieren.