



(11)

EP 2 123 588 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
10.10.2018 Patentblatt 2018/41

(51) Int Cl.:
B66C 13/06 (2006.01) **B66C 23/52** (2006.01)
B63B 27/10 (2006.01) **B63B 17/00** (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **09006080.7**

(22) Anmeldetag: **04.05.2009**

(54) **Kransteuerung mit aktiver Seegangfolge**

Crane control with active swell sequence

Commande de grue dotée d'un suivi actif de houle

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO SE SI SK TR

(30) Priorität: **21.05.2008 DE 102008024513**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
25.11.2009 Patentblatt 2009/48

(73) Patentinhaber: **Liebherr-Werk Nenzing GmbH**
6710 Nenzing (AT)

(72) Erfinder:
• **Schneider, Klaus, Dr.**
88145 Hergatz (DE)
• **Sawodny, Oliver**
70186 Stuttgart (DE)
• **Neupert, Jörg**
70825 Korntal-Münchingen (DE)
• **Mahl, Tobias**
70563 Stuttgart (DE)

• **Küchler, Sebastian**
71034 Böblingen (DE)

(74) Vertreter: **Laufhütte, Dieter et al**
Lorenz Seidler Gossel
Rechtsanwälte Patentanwälte
Partnerschaft mbB
Widenmayerstraße 23
80538 München (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A- 1 757 554 **WO-A-2005/090226**
WO-A-2006/052907 **WO-A1-01/42126**
WO-A2-2009/036456 **JP-A- 1 285 586**
US-B1- 6 631 300 **US-B1- 6 826 452**
US-B1- 7 367 464

• **NEUPERT J ET AL: "A heave compensation approach for offshore cranes" AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2008, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 11. Juni 2008 (2008-06-11), Seiten 538-543, XP031296111 ISBN: 978-1-4244-2078-0**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 2 123 588 B1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Kransteuerung mit aktiver Seegangsfolge für einen auf einem Schwimmkörper angeordneten Kran, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist.

[0002] Solche Kransteuerungen werden benötigt, um bei einem auf einem Schwimmkörper wie z. B. einem Schiff, einem Halbtaucher oder einer Barke montierten Kran die unerwünschten Einflüsse des Seegangs auf die Bewegung der Last auszugleichen, welche ansonsten die Sicherheit und die Genauigkeit des Hubes beeinträchtigen.

[0003] Für die Installation von Offshore-Windparks und Unterwasserförderungsanlagen besteht dabei ein zunehmender Bedarf an Schwimmkränen, so dass Kransteuerungen mit Seegangsfolge eine besondere Beutung zukommt. Eine solche Kransteuerung sollte dabei einen sicheren, exakten und effizienten Betrieb des Kranes auch unter schlechten Wetterbedingungen mit starkem Seegang möglich machen, um wetterbedingte Ausfallzeiten zu minimieren. Zudem sollten die Sicherheit des Bedienpersonals und des Equipments gewährleistet werden.

[0004] Ist ein Kran auf einem Schwimmkörper montiert, führt eine Bewegung des Schwimmkörpers durch den Seegang zu einer Bewegung des Lastaufhängepunkts der am Kran hängenden Last. Zum einen führt dies zu einer entsprechenden Bewegung der Last, was die exakte Positionierung der Last behindert und das Montagepersonal gefährdet. Soll z. B. ein Rotor an einem Offshore-Windrad montiert werden, erfordert dies eine äußerst genaue Positionierung der Rotorblätter an der Nabe, wo diese von Monteuren verschraubt werden müssen. Jede unkontrollierte Bewegung des Rotorblatts durch den Seegang kann hier katastrophale Folgen haben. Zudem kann die Bewegung des Lastaufhängepunktes zu kritischen Kraftspitzen im Seil und im Kran führen, was insbesondere bei Tiefseehüben berücksichtigt werden muss.

[0005] Bereits bei Kranen gemäß dem Stand der Technik wird versucht, die Bewegung der Last bei Seegang zumindest teilweise auszugleichen. Zum einen sind dabei passive Systeme bekannt, bei welchen die Seegangsbewegung durch die Konstruktion von Kran und Hubwerk passiv ausgeglichen werden soll. Auch sind bereits aktive Steuerungen bekannt, bei welchen die durch die Seegangsbewegung erzeugte Bewegung des Lastaufhängepunkts durch eine aktive Gegensteuerung ausgeglichen werden soll. Keines der bekannten Systeme hat jedoch zu einer wirklich zufriedenstellenden Lösung geführt.

[0006] Aus der EP 1 757 554 A2 ist eine Kransteuerung für einen Schiffskran mit Lastpendeldämpfung bekannt, die eine Diagnosekomponente mit integrierter Modell- und Prognosekomponente aufweist. Mit Hilfe der Prognosekomponente wird ein Pendeln der Last auf Grundlage des vorliegenden Seegangs prognostiziert und der Kransteuerung zur Kompensierung der Pendelbewegung zugeführt.

[0007] WO2005090226 A1 offenbart eine Kransteuerung mit aktiver Seegangsfolge für einen auf einem Schwimmkörper angeordneten Kran, mit einer Messvorrichtung, welche eine aktuelle Seegangsbewegung aus Sensordaten ermittelt und einer Prognosevorrichtung, welche eine zukünftige vertikale Bewegung des Lastaufhängepunkts anhand der ermittelten aktuellen Seegangsbewegung und eines Modells der Seegangsbewegung prognostiziert.

[0008] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, eine verbesserte Kransteuerung mit aktiver Seegangsfolge zur Verfügung zu stellen.

[0009] Diese Aufgabe wird von einer Kransteuerung gemäß Anspruch 1 gelöst. Die vorliegende Erfindung stellt damit eine Kransteuerung mit aktiver Seegangsfolge für einen auf einem Schwimmkörper angeordneten Kran, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist, zur Verfügung. Die Kransteuerung weist dabei eine Messvorrichtung auf, welche eine aktuelle Seegangsbewegung aus Sensordaten ermittelt. Weiterhin ist eine Prognosevorrichtung vorgesehen, welche die vorherrschenden Moden der Seegangsbewegung aus den Daten der Messvorrichtung bestimmt und anhand der bestimmten vorherrschenden Moden ein Modell des Seegangs erstellt und eine zukünftige vertikale Bewegung des Lastaufhängepunkts anhand der ermittelten aktuellen Seegangsbewegung und eines Modells der Seegangsbewegung prognostiziert. Weiterhin ist eine Bahnsteuerung der Last vorgesehen, welche durch die Ansteuerung des Hubwerkes des Kranes aufgrund der prognostizierten Bewegung des Lastaufhängepunkts die vertikale Bewegung der Last durch den Seegang zumindest teilweise ausgleicht.

[0010] Durch die erfindungsgemäße Prognosevorrichtung ist es damit möglich, anhand der ermittelten aktuellen Seegangsbewegung und eines Modells der Seegangsbewegung die zukünftige vertikale Bewegung des Lastaufhängepunkts bei der Ansteuerung des Hubwerkes zu berücksichtigen, so dass diese Bewegung des Lastaufhängepunkts durch eine Veränderung der Seillänge ausgeglichen wird und die Last der vorgesehenen Bahn folgt. Die Bahnsteuerung anhand der von der Prognosevorrichtung prognostizierten zukünftigen Bewegung des Lastaufhängepunktes führt dabei im Vergleich zu einer Bahnsteuerung, welche allein auf der aktuellen Bewegung des Lastaufhängepunktes beruht, zu einer erheblich verbesserten Seegangsfolge. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass die Aktoren eines Kranes insbesondere bei großen Lasten hohe Totzeiten und erhebliche Zeitkonstanten von bis zu 0,5 Sekunden aufweisen. Eine Ansteuerung allein auf Grundlage der aktuell gemessenen Bewegung des Lastaufhängepunktes würde damit zu einer verspäteten Reaktion führen. Erfindungsgemäß weist die Prognosevorrichtung daher einen Prognosehorizont von mehr als 0,5 Sekunden, vorteilhafterweise von mehr als einer und weiterhin vorteilhafterweise von mehr als 2 Sekunden auf, so dass trotz der Totzeiten und Zeitkonstanten des Hubwerkes ein sicherer Ausgleich der Bewegung des Lastaufhängepunktes aufgrund der Seegangsbewegung des Schwimmkörpers vorgenommen werden kann. Vorteilhafterweise be-

rücksichtigt die Steuerung dafür die prognostizierte Bewegung des Lastaufhängepunkts und die Totzeiten des Hubwerks bei dessen Ansteuerung.

[0011] Neben der prognostizierten Bewegung des Lastaufhängepunkts geht in die Bahnsteuerung der Last selbstverständlich auch die gewünschte Bahn der Last ein, welche von einer Bahnplanung z. B. aufgrund von Steuerbefehlen einer Bedienperson oder aufgrund eines automatisch vorgesehenen Ablaufs des Hubes generiert wird. Die Bahnsteuerung sorgt nun erfindungsgemäß dafür, dass die von der Bahnplanung vorgesehene Bahn der Last trotz der Bewegung des Lastaufhängepunkts, welche von der Seegangsbewegung des Schwimmkörpers hervorgerufen wird, eingehalten wird. Durch die erfindungsgemäße Kransteuerung lässt sich damit eine exakte Positionierung der Last gewährleisten. Weiterhin ist sichergestellt, dass es beim Hub nicht zu Überlastungen des Seils oder des Kranes kommt.

[0012] Vorteilhafterweise ist dabei das in der Prognosevorrichtung verwendete Modell der Seegangsbewegung unabhängig von den Eigenschaften, insbesondere von der Ausführung und Dynamik des Schwimmkörpers. Hierdurch kann die erfindungsgemäße Kransteuerung flexibel für eine Vielzahl von Schwimmkörpern eingesetzt werden. Insbesondere kann damit der Kran auf unterschiedlichen Schiffen montiert werden, ohne dass die Seegangsfolge der Kransteuerung hierfür jeweils angepasst werden müsste, was bei einer von den Eigenschaften des Schiffes abhängigen Modellierung sehr aufwendig wäre. Das Modell wird damit unabhängig von den Eigenschaften des Schwimmkörpers allein auf Grundlage der gemessenen Seegangsbewegung erstellt, wozu die periodischen Anteile der Seegangsbewegung herangezogen werden. Hierfür wird laufend nicht nur die aktuelle Seegangsbewegung, sondern der Verlauf der Seegangsbewegung über einen gewissen Zeitraum analysiert.

[0013] Vorteilhafterweise werden dabei die vorherrschenden Moden der Seegangsbewegung über eine Frequenzanalyse, aus den Daten der Messvorrichtung bestimmt. Die Prognosevorrichtung analysiert also die Seegangsbewegung und bestimmt die Frequenzen, welche die Bewegung des Schwimmkörpers durch den Seegang bestimmen. Z. B. kann hier eine Fourier-Analyse der Seegangsbewegung durchgeführt werden, aus welcher durch Peak-Detektion die vorherrschenden Moden bestimmt werden. Vorteilhafterweise werden dabei mindestens die drei stärksten Moden der Seegangsbewegung berücksichtigt, weiterhin vorteilhafterweise bis zu zehn Moden. Die Moden werden dabei über eine längerfristige Beobachtung der Seegangsbewegung bestimmt, wobei sich die Analyse auf einen Zeitraum der vorangegangenen Seegangsbewegung von mehreren Minuten erstrecken kann, z.B. auf die vorangegangenen fünf Minuten. Die Prognosevorrichtung erstellt damit auf Grundlage der vorherrschenden Moden ein vorläufiges Modell des Seegangs, welches auf einer längerfristigen Beobachtung der Seegangsbewegung beruht.

[0014] Vorteilhafterweise wird dabei das so erstellte Modell anhand der Daten der Messvorrichtung laufend parametrisiert, insbesondere über einen Beobachter, wobei insbesondere Amplitude und Phase der Moden parametrisiert werden. Neben der Erstellung eines vorläufigen Modells durch die längerfristige Bestimmung der vorherrschenden Moden erfolgt damit laufend eine Anpassung dieses Modells an die aktuellen Daten der Messvorrichtung. Dabei erfolgt ständig ein Abgleich zwischen dem vom Modell prognostizierten und dem gemessenen Seegang, wobei die Prognosevorrichtung laufend die Amplituden und Phasen der einzelnen im Modell verwendeten Moden aktualisiert. Ebenso kann die Gewichtung der einzelnen Moden im Modell laufend aktualisiert werden.

[0015] Erfindungsgemäß ergibt sich so eine zweiteilige Prognose, bei welcher zunächst aufgrund einer langfristigen Analyse die vorherrschenden Moden der Seegangsbewegung bestimmt werden, welche die Grundlage für das Modell der Seegangsbewegung liefern. Dieses Modell wird dann über eine Beobachterschaltung ständig aktualisiert, indem die Amplitude und Phase der Moden durch einen Vergleich der vom Modell prognostizierten Seegangsbewegung und der gemessenen Seegangsbewegung nachparametrisiert werden. Die vorherrschenden Moden werden von dem Beobachter dagegen nicht geändert.

[0016] Vorteilhafterweise wird jedoch bei einer Änderung der vorherrschenden Moden des Seeganges das Modell jeweils aktualisiert. Diese Änderung der vorherrschenden Moden des Seegangs wird dabei über eine längerfristige Beobachtung der Seegangsbewegung erkannt, wobei das Modell aktualisiert wird, wenn die Abweichung der im Modell verwendeten Moden mit den tatsächlich vorherrschenden Moden eine bestimmte Schwelle überschritten hat. Z. B. kann eine Aktualisierung der vorherrschenden Moden im Modell des Seeganges alle 20 Sekunden vorgesehen sein.

[0017] Weiterhin vorteilhafterweise weist die Bahnsteuerung erfindungsgemäß eine Vorsteuerung auf, welche auf Grundlage von Sensordaten stabilisiert wird. Die Bahnsteuerung steuert damit das Hubwerk aufgrund des prognostizierten Bewegung des Lastaufhängepunktes so an, dass eine geplante Bahn der Last möglichst genau eingehalten wird. Zur Stabilisierung der Vorsteuerung wird dabei auf Sensordaten zurückgegriffen, so dass mittels einer Beobachterschaltung eine genauere Ansteuerung des Hubwerks möglich wird.

[0018] Vorteilhafterweise beruht die Bahnsteuerung dabei auf einem Modell von Kran, Seil und Last, in welchem eine Änderung der Seillänge aufgrund der Ausdehnung des Seiles berücksichtigt wird. Da insbesondere bei Tiefenhüben Seillängen von bis zu 4000 m auftreten können, kann es zu einer großen Ausdehnung des Seiles kommen, welche nun erfindungsgemäß bei der Bahnsteuerung berücksichtigt wird.

[0019] Weiterhin vorteilhafterweise beruht die Bahnsteuerung dabei auf einem Modell von Kran, Seil und Last, welches die Dynamik des Hubwerkes und/oder des Seiles berücksichtigt und insbesondere auf einem physikalischen Modell der Dynamik des Systems aus Hubwerk, Seil und/oder Last beruht. Vorteilhafterweise wird dabei die Dynamik des Hubwerks

berücksichtigt, so dass die Vorsteuerung z. B. Reaktionszeiten und Trägheiten des Hubwerks mit berücksichtigt. Zur Berücksichtigung der Dynamik des Systems aus Seil und Last wird dieses vorteilhafterweise als ein gedämpfter Oszillator behandelt. Die sich hieraus ergebende Dynamik wird im System modelliert und geht in die Vorsteuerung der erfindungsgemäßen Bahnsteuerung ein, wodurch die dynamische Längenänderung des Seils in der Vorsteuerung berücksichtigt werden kann.

[0020] Vorteilhafterweise ist dabei erfindungsgemäß ein Kraftsensor zum Messen der im Seil und/oder auf das Hubwerk wirkenden Kraft vorgesehen, dessen Meßdaten in die Bahnsteuerung eingehen und über welche insbesondere die Seillänge bestimmt wird. Eine direkte Rückkopplung der Position der Last auf die Bahnsteuerung zur Stabilisierung ist dabei nicht möglich, da die Position der Last selbst schwer gemessen werden kann. Erfindungsgemäß wird deshalb die Kraft im Seil bzw. am Hubwerk gemessen und zur Stabilisierung der Ansteuerung herangezogen. Dabei kann die Seillänge aus der Kraft im Seil auf Grundlage des Modells für die Dynamik des Systems aus Seil und Last rekonstruiert werden und hierüber die Position der Last bestimmt werden.

[0021] Weiterhin vorteilhafterweise umfasst die Messvorrichtung der vorliegenden Erfindung Gyroskope, Beschleunigungssensoren und/oder GPS-Elemente, aus deren Meßdaten die aktuelle Seegangsbewegung ermittelt wird. Dabei können neben Messvorrichtungen, in welchen nur einer dieser drei Sensor-Typen zum Einsatz kommt, auch Systeme mit einer Kombination aus zwei oder drei dieser Sensor-Typen verwendet werden. Insbesondere kommen erfindungsgemäß Gyroskope zum Einsatz. Eine absolute Positionsbestimmung ist mit solchen Gyroskopen zwar nicht möglich, für die aktive Seegangsfolge jedoch auch nicht nötig, da hier lediglich die relativ hochfrequenten Bewegungen des Schwimmkörpers aufgrund der Seegangsbewegung berücksichtigt werden müssen, während ein langsamer Drift nicht weiter ins Gewicht fällt. Aus den Daten der Gyroskope werden dann durch einmalige oder zweimalige Integration die Winkelgeschwindigkeiten bzw. die Position des Messpunktes, an welchem die Gyroskope angeordnet sind, bestimmt.

[0022] Vorteilhafterweise sind dabei die Sensoren der Messvorrichtung am Kran angeordnet, insbesondere am Kranfundament, wobei die Messvorrichtung die Bewegung des Lastaufhängepunkts vorteilhafterweise anhand eines Modells des Kranes und der relativen Bewegung von Lastaufhängepunkt und Messpunkt bestimmt. Sind die Sensoren am Fundament des Kranes angeordnet, bewegen sich diese fest mit dem Schwimmkörper mit und messen so lediglich die Seegangsbewegung des Schwimmkörpers. Anhand des Modells des Kranes kann aus dieser Seegangsbewegung des Schwimmkörpers die Bewegung des Lastaufhängepunkts ermittelt werden.

[0023] Vorteilhafterweise wird dabei die Seegangsbewegung des Schwimmkörpers in der Prognosevorrichtung zur Prognose der zukünftigen Bewegung des Schwimmkörpers herangezogen und daraus anhand des Modells des Kranes die zukünftige Bewegung des Lastaufhängepunktes aufgrund dieser zukünftigen Bewegung des Schwimmkörpers bestimmt. Durch die Anordnung der Sensoren der Messvorrichtung am Kran ist dabei sichergestellt, dass die erfindungsgemäße Kransteuerung flexibel und unabhängig von den Eigenschaften des Schwimmkörpers eingesetzt werden kann.

[0024] Beispielhaft bestimmt die Prognosevorrichtung dabei lediglich die zukünftige Bewegung des Lastaufhängepunkts in der Vertikalen. Durch diese Beschränkung auf einen Freiheitsgrad wird eine besonders einfache Prognosevorrichtung zur Verfügung gestellt, welche mit vergleichsweise geringem konstruktiven Aufwand dennoch die entscheidenden Daten zum Ausgleich der Seegangsbewegung liefert.

[0025] Die vorliegende Erfindung umfasst weiterhin einen Kran mit einer Kransteuerung, wie sie oben beschrieben wurde. Insbesondere handelt es sich dabei um einen Schiffskran. Neben einem Hubwerk umfaßt der erfindungsgemäße Kran dabei vorteilhafterweise ein Schwenkwerk und ein Wippwerk, welche ebenfalls von der erfindungsgemäßen Kransteuerung angesteuert werden.

[0026] Weiterhin umfasst die vorliegende Erfindung auch einen Schwimmkörper mit einem Kran, wie er erfindungsgemäß beschrieben wurde. Insbesondere handelt es sich dabei vorteilhafterweise um ein Schiff mit einem Schiffskran.

[0027] Die vorliegende Erfindung umfasst weiter ein Verfahren zur Steuerung eines auf einem Schwimmkörper angeordneten Krans, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist, mit den Schritten: Ermitteln der aktuellen Seegangsbewegung aus Sensordaten, Bestimmung der vorherrschenden Moden der Seegangsbewegung aus den Daten der Messvorrichtung und Ermittlung eines Modells des Seegangs anhand der bestimmten vorherrschenden Moden, Prognostizieren einer zukünftigen vertikalen Bewegung des Lastaufhängepunkts anhand der ermittelten aktuellen Seegangsbewegung und des Modells der Seegangsbewegung, und zumindest teilweises Ausgleichen der vertikalen Bewegung der Last durch den Seegang durch die Ansteuerung des Hubwerkes des Kranes aufgrund der prognostizierten Bewegung des Lastaufhängepunkts. Offensichtlich ergeben sich durch das erfindungsgemäße Verfahren dabei die gleichen Vorteile, wie sie bereits bezüglich der Kransteuerung beschrieben wurden.

[0028] Weiterhin vorteilhafterweise wird bei dem Verfahren zur Steuerung des Krans dabei so vorgegangen, wie dies bereits bezüglich der Kransteuerung beschrieben wurde. Insbesondere wird das erfindungsgemäße Verfahren dabei mittels einer Kransteuerung durchgeführt, wie sie oben beschrieben wurde.

[0029] Die vorliegende Erfindung wird nun anhand eines Ausführungsbeispiels sowie anhand von Zeichnungen näher beschrieben. Dabei zeigen:

Fig. 1 ein Ausführungsbeispiel eines Schiffskranes, bei welchem die vorliegende Erfindung zum Einsatz kommt,

- Fig. 2 eine Prinzipdarstellung eines Messverfahrens zur Bestimmung einer Seegangsbewegung eines Schiffes,
- Fig. 3 eine Prinzipdarstellung eines Verfahren, mit welchem aus der Seegangsbewegung des Schiffes und einer Relativbewegung zwischen Lastaufhängepunkt und Messpunkt die Seegangsbewegung des Lastaufhängepunktes bestimmt wird,
- Fig. 4 eine Prinzipdarstellung eines Ausführungsbeispiels eines Prognoseverfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung,
- Fig. 5 eine Prinzipdarstellung einer Modellidentifikation und Vorparametrierung in dem Ausführungsbeispiel eines Prognoseverfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung,
- Fig. 6 eine Darstellung des i -ten Werts der Bildfolge und dessen komplex konjugiertem Wert an der Stelle $N_{DFT} - i$ während der Phasenbestimmung zur Vorparametrierung in dem Ausführungsbeispiel eines Prognoseverfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung,
- Fig. 7 eine Prinzipdarstellung der Korrektur der Modellidentifikation und Vorparametrierung mittels eines Beobachters in dem Ausführungsbeispiel eines Prognoseverfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung,
- Fig. 8 eine Prinzipdarstellung eines Ausführungsbeispiels einer Kransteuerung gemäß der vorliegenden Erfindung,
- Fig. 9 eine schematische Darstellung eines Modells für die Dynamik des Systems aus Seil und Last,
- Fig. 10 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines Prognoseverfahrens der Seegangsbewegung,
- Fig. 11 eine Darstellung der Veränderung der vorherrschenden Moden der Seegangsbewegung über die Zeit,
- Fig. 12 eine Darstellung einer vorhergesagten und einer tatsächlichen Seegangsbewegung,
- Fig. 13 eine graphische Darstellung der Lastbewegung mit einer reinen Vorsteuerung ohne Rückkopplung und ohne Prognose,
- Fig. 14 eine graphische Darstellung der Lastbewegung mit einem geschlossenen Regelkreislauf, aber ohne Prognose und
- Fig. 15 eine graphische Darstellung der Lastbewegung unter Verwendung des Steuerungsverfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0030] Zunächst wird nun ein Ausführungsbeispiel eines Messverfahrens beschrieben, welches einerseits auf der Messung der Bewegung des Schiffs und andererseits auf der Bestimmung der relativen Lage der Auslegerspitze des Kransystems ausgehend von dessen Fundament basiert. Für die erstgenannte Messaufgabe wird eine Inertialplattform eingesetzt, welche die gradlinigen Beschleunigungen und rotatorischen Drehraten um alle drei Achsen des Schiffs misst. Nachfolgend genannte ist von der Sensorik des Kransystems zu absolvieren. Mit dieser Messanordnung wird eine driftfreie Messung der Tauchbewegung, eine äußerst geringe Phasenverschiebung im signifikanten Frequenzbereich der Tauchbewegung und eine maximale Messabweichung ca. 15 % der Amplitude der Tauchbewegung erreicht. Dem Ausführungsbeispiel eines Verfahrens zur Prognose der Tauchbewegung des Lastaufhängepunktes liegt ein Modell dieser Bewegung zu Grunde. Da das Modell jedoch nicht a priori erstellt werden kann, gilt es dieses an Hand der gemessenen Tauchbewegung online zu identifizieren und zu parametrieren. Die Identifikation wird mittels einer Frequenzanalyse der vertikalen Bewegung des Lastaufhängepunktes erreicht. Um mit dem Modell der Tauchbewegung diese stets zutreffend zu beschreiben, erfolgt die Identifikation in regelmäßigen Zeitabständen. Für eine bestmögliche Parametrisierung der modellierten Tauchbewegung wird ein Beobachter eingesetzt. Die vorhergesagte Seegangsbewegung wird dann eingesetzt, um den Einfluss des Seegangs auf die Bewegung der Last durch eine Gegensteuerung mit dem Hubwerk zu minimieren.

[0031] Das Ausbringen und Bergen von unbemannten Forschungsstationen in mehreren tausend Meter Tiefe, welche Ressourcenquellen aufspüren und wissenschaftliche Erkenntnisse der Ozeanographie liefern, ist dabei ohne eine Bestimmung der Seegangsbewegung des Einsatzschiffs nicht möglich. Zudem werden jährlich zahlreiche Konstruktionen wie Öl- und Gasbohrinseln oder auch Windparks mit einigen dutzend Windkraftträgern errichtet, um dem enormen

Energiebedarf der Menschheit gerecht zu werden. Die Montage dieser Anlagen wird dabei von Schwimmkränen durchgeführt, die dem Seegang der jeweiligen Region ausgesetzt sind. Zur Vermeidung von Kollisionen der Last mit dem Meeresboden oder dem bereits bestehenden Rohbau muss die durch die Schiffsbewegung verursachte Höhenänderung der Last durch Seegangsfolgeeinrichtungen kompensiert werden. Hierbei ist wiederum die Kenntnis der vertikalen Schiffsbewegung von zentraler Bedeutung.

[0032] Für diese Anwendungsbeispiele genügt die Messung der Seegangsbewegung des Schiffs. Hierunter wird die vertikale Auslenkung des Schiffs um dessen Ruhelage verstanden. Die Ruhelage eines Schiffs ist dabei als die aktuelle, mittlere Höhe des glatten Meeresspiegels definiert. Langsame Pegeländerungen, die sich unterhalb einer fest definierten Frequenzgrenze befinden, sind somit nicht Bestandteil der Seegangsbewegung. Hierunter fallen beispielsweise die durch die Gezeiten hervorgerufenen Pegeländerungen. Diese sind eindeutig nicht der Seegangsbewegung zuzuordnen.

[0033] Die vorliegende Erfindung stellt hierfür ein Messverfahren zur Verfügung, welches in Verbindung mit einem beliebigen Kransystem mit aktiver Seegangsfolge (AHC: Active Heave Compensation) verwendet werden kann. Dabei ermittelt das Messverfahren einerseits die Seegangsbewegung des Lastaufhängepunktes und berechnet andererseits eine Kurzzeitprognose für den weiteren, zeitlichen Verlauf dieser Bewegung. Als Gesamtsystem kann der Verbund zwischen Kran und fest installiertem Messsystem, der als aktive Seegangsfolgeeinrichtung bezeichnet wird, auf eine Vielzahl von Schiffen montiert werden, ohne dass erhebliche Anpassungsmaßnahmen erforderlich sind. Je nach Konstruktion des Krans ist diese Seegangsfolgeeinrichtung entweder als Schwimmkran, oder aber, auf einem Einsatzfahrzeug befindlich, auch für den Tiefseehub zu verwenden. Hierfür ist das Messverfahren komplett autonom und agiert plattformunabhängig. Auf die Kenntnis von schiffsspezifischen Daten wie Verdrängung, Rumpfform, usw. oder auch die Platzierung des Kransystems auf dem Deck des Schiffs wird dabei bewusst verzichtet. Im Weiteren ist deshalb der Begriff Schiff auch sehr weitläufig zu verstehen. Er ist gleichbedeutend mit jedem beliebigen Schwimmkörper und umfasst folglich auch Barge oder Halbtaucher.

[0034] Dabei versteht man unter einer Seegangsfolgeeinrichtung ein technisches System, welches in der Lage ist die durch den Seegang angeregte vertikale Lastschwingungen zu reduzieren. Im Idealfall ist die Last auf einer äquidistanten Entfernung vom Meeresboden zu halten, unabhängig davon, ob sich der Schwimmkran auf einem Wellenberg oder in einem Wellental befindet. Zudem soll die Verkipfung des Schwimmkrans um die Längs- und Querachse, welche man Roll- und Stampfbewegung nennt, die Lasthöhe nicht beeinflussen. Wird die Kompensation der ungewollten Lastschwingung rein konstruktiv bewirkt, so liegt eine passive Seegangsfolge vor. Hingegen spricht man von einer aktiven Seegangsfolge sobald der Lastschwingung bewusst mittels Aktoren entgegengewirkt wird.

[0035] Das vorliegende Messverfahren ist dabei in der Lage, die Seegangsbewegung des Lastaufhängepunktes hochauflösend und zeitlich unverzögert zu bestimmen. Dies wird auch im Offshoreeinsatz erreicht, bei dem Wellenhöhen von bis zu 10 m zu erwarten sind. Langsame, absolute Positionsänderungen der Ruhelage des Schiffs sind dabei nicht von Interesse.

[0036] Die Prognose der Seegangsbewegung des Lastaufhängepunktes hat das Ziel den negativen Einfluss der Totzeiten der Aktuatoren von Seegangsfolgeeinrichtungen auf die Lasthöhe zu minimieren. Für die Generierung der Solltrajektorie der Lastbewegung kann somit ein Positionsverlauf des Lastaufhängepunktes vorgegeben werden, der um die Totzeit des entsprechenden Aktors in der Zukunft liegt, womit eine konstante Totzeit bestenfalls vollkommen ausgeglichen wird. Da die Lastmassen beim Tiefseehub im Bereich von bis zu 100 t liegen und bei Kranhalbtauchern sogar an die 14000 t betragen können, sind Totzeiten von ca. 0,2 - 0,5 s die Regel. Diese begründen sich aus der enormen Energie welche für die Lastbewegung bereit gestellt werden muss. Für die Erfüllung der geforderten Aufgabe genügt der Prognose somit ein Zeitfenster von etwa 1 s.

[0037] In Fig. 1 ist ein Kranschiff zu sehen, das hauptsächlich für Installationsaufgaben überhalb des Meeresspiegels verwendet wird. Deutlich zu erkennen ist, dass Schwimmkrane in der Regel einen Lastaufhängepunkt besitzen, der sich weit oberhalb des Meeresspiegels befindet. Seine Lage kann dabei vom Kranfahrer mittels Bedienhebel vorgegeben werden, womit die Last zielgenau positioniert werden kann. Beim Tiefseehub werden dagegen größtenteils starre Kranstrukturen verwendet, die einen möglichst niedrigen Lastaufhängepunkt aufweisen. Diese haben den Vorteil die Bewegungen des Schiffs nicht unnötig zu verstärken. Horizontale Lageänderungen der Last werden dabei entweder durch Aktoren am Lasthaken, oder durch entsprechende Positionierung des Einsatzschiffs erreicht.

[0038] Bezüglich der Seegangsfolge ist der tatsächliche Aufbau des Kransystems nicht von Bedeutung. Lediglich die vertikale Position des Lastaufhängepunktes muss gemessen werden können. Da es sich jedoch in der Regel nicht realisieren lässt die Sensorik direkt am Lastaufhängepunkt zu installieren, ist ein alternativer Anbringungsort der Sensorik zu wählen. Hier erweist sich eine Befestigung nahe dem Kranfundament als sinnvoll. Einerseits sind hier die geringsten Vibrationen des Kransystems zu erwarten, welche die Messergebnisse verfälschen. Andererseits wird hier eine fest definierte Ausrichtung der Sensorik während des Betriebs erreicht. Diese wäre bei einer Positionierung der Sensorik an einem beweglichen Teil des Krans beispielsweise nicht gegeben.

[0039] Für diese Erfindung wird daher zur Messung der Schiffsbewegung eine Inertialplattform (IMU Initial Measurement Unit) verwendet, welche am Kranfundament befestigt ist. Diese kostengünstige und autonome Messeinheit enthält drei Beschleunigungsaufnehmer für die Messung der gradlinigen Schiffsbewegungen, als auch drei Drehratensensoren

für die Bestimmung der Roll-, Stampf-, und Gierbewegung des Schiffs. Die Abtastfrequenz der Messungen liegt bei 40 Hz. Die relevanten Schiffsbewegungen befinden sich hingegen in einem Frequenzbereich zwischen 0,04 Hz und 1 Hz. Des Weiteren geraten selbst bei rauher See die Messgrößen im gesamten Einsatzbereich der Schiffskrane nicht in den Bereich der Messgrößenbeschränkung. Somit ist mittels der gewählten Inertialplattform eine genaue Bestimmung der Schiffsbewegung in allen 6 Freiheitsgraden möglich.

[0040] Die für die vorliegende Erfindung benutzte Methode für die Messung der Schiffsbewegungen basiert auf den Messsignalen einer einzigen Inertialplattform, die mit integrierenden Filtern konstanter Grenzfrequenz die gewünschten Positions- und Winkelsignale berechnet. Wird im Rahmen der Seegangsfolge eine genauere Messung angestrebt, so ermöglicht die klare Trennung zwischen Messung und Prognose zudem das Messverfahren jederzeit auszutauschen, ohne dass weitere Anpassungen notwendig sind.

[0041] Um die Verkipfung des Schiffs aus den von den Gyroskopen der Inertialplattform gemessenen Drehraten zu erhalten, ist eine einfache Integration der notwendig. Zudem gilt es die typischen Messfehler wie Messrauschen oder Biasfehler zu kompensieren. Dies geschieht durch die Verwendung je eines einfach integrierenden Filters pro Drehrichtung. Zur Erlangung der Position der Inertialplattform sind die Beschleunigungsdaten zweifach zu integrieren. Auch hier sind auftretende Messfehler weitestgehend zu eliminieren, womit für die drei gradlinigen Bewegungsrichtungen jeweils ein zweifach integrierender Filter zu verwenden ist. Dies ist schematisch in Fig. 2 dargestellt.

[0042] Unter Verwendung der gerade beschriebenen Signalverarbeitung zur Messung der Schiffsbewegung kann die komplette Bewegung des Schiffes aus den Messsignalen der Inertialplattform bestimmt werden. Hierbei werden statische Biasabweichungen vollkommen eliminiert und ein langsamer Drift in den Messsignalen weitestgehend kompensiert. Auf Grund der notwendigen Integration der Messwerte wird zudem hochfrequentes Sensorrauschen stark unterdrückt, womit keine zusätzliche Tiefpassfilterung notwendig ist.

[0043] Da zur Messung der Seegangsbewegung des Lastaufhängepunktes zudem der Abstand zwischen dem Sensor zur Messung der Schiffsbewegung und der Lastaufhängung notwendig ist, wird dieser gesondert ermittelt. Die dafür notwendige Sensorik ist jedoch aus konventionellen Kransteuerungen bekannt. Aus der Messung der Schiffsbewegung und der Kenntnis des Abstands zwischen dem Sensor zur Messung der Schiffsbewegung und der Lastaufhängung kann damit, wie in Fig. 3 gezeigt, die aktuelle Bewegung des Lastaufhängepunktes bestimmt werden.

[0044] Bei dem verwendeten Modell zur Prognose der Seegangsbewegung handelt es sich nicht um eine a priori bekannte Beschreibung der Dynamik des Schiffs. Das Modell bildet vielmehr die Dynamik der gemessenen Seegangsbewegung ab. Diese wird während der Laufzeit der Seegangsfolge bestimmt, womit das Modell ständig neu identifiziert und parametrisiert wird.

[0045] Strukturell ist das Verfahren gemäß dem Signalflussdiagramm nach Abbildung 4 aufgebaut. Die Seegangsbewegung wird dabei als eine periodische Bewegung angesehen werden. Ihr Modell wird somit aus einer Überlagerung von N Sinusschwingungen, welche im Weiteren als Moden bezeichnet werden, gebildet. Dabei wird jede Mode vollständig durch ihre Amplitude A , Kreisfrequenz ω_M und Phase ϕ_M beschrieben.

[0046] Für die online durchzuführende Identifikation des Modells der Seegangsbewegung erfolgt als erster Schritt eine Frequenzanalyse der gemessenen Seegangsbewegung. An Hand dieser wird zudem eine vorläufige Parametrierung des vollständig identifizierten Modells vollzogen. Dieses Modell dient daraufhin im Weiteren als Basis eines linearen, oder aber nichtlinearen Beobachters und wird in fest definierten Zeitabständen aktualisiert. Dieser führt die exakte Adaption der Modellparameter unter Berücksichtigung der aktuell gemessenen Seegangsbewegung durch. Mit der Kenntnis des Modells, als auch dessen Parametern ist es die Aufgabe der Prognose eine Vorhersage der Seegangsbewegung für einen zukünftigen Zeitpunkt zu berechnen.

[0047] Ziel der Modellidentifikation ist es die Grundstruktur des Modells der Seegangsbewegung zu bestimmen. Die Bestimmung der notwendigen Anzahl der Moden N beruht dabei auf einer online durchgeführten, diskreten Fourier-Analyse der gemessenen Seegangsbewegung zum Zeitpunkt t_i und anschließender Auswertung. Hierzu werden die signifikanten Frequenzen der Seegangsbewegung an Hand des Amplitudengangs ermittelt. Diese Auswertung des Amplitudengangs erfolgt zur Laufzeit der Messung mittels der Spitzenerkennung. Neben der Anzahl der für die Modellidentifikation zu verwendenden Moden N liefert die Spitzenerkennung die Frequenzen ω_N der erkannten Moden und eine erste Schätzung des Vektors der Amplituden. Die Phasen der Moden werden anschließend separat aus dem Phasengang der diskreten Fourier-Transformation bestimmt. Wird das Modell mit diesen Parametern versehen, so liefert es die modellierte Seegangsbewegung.

[0048] Unter Verwendung der erstellten Zustandsmodelle der Seegangsbewegung ist die gewünschte Parameteradaption gleich einer Schätzung des aktuellen Systemzustands. Die Problemstellung der Modellparametrierung kann folglich analog einer Beobachtungsaufgabe formuliert werden. Ein Beobachter hat stets die Aufgabe aus den gemessenen Ausgangsgrößen einer Strecke mit Sensorik den vollständigen Zustand dieser Strecke zu schätzen. Der gesuchte Zustand wird dabei mit Hilfe eines Modells der Strecke bestimmt, das an Hand der Differenzen zwischen den realen und simulierten Ausgangssignalen korrigiert wird.

[0049] Mit online vergleichenden Beobachtern kann dabei eine zutreffende Vorhersage der gemessenen Seegangsbewegung für Prognosezeiträume von kleiner 2 s durchgeführt werden. Wird zudem bedacht, dass die angestrebte

Aufgabe der Prädiktion die Kompensation von Totzeiten im Bereich von ca. 0,5 s ist, so bietet das vorgestellte Prognoseverfahren die optimalen Voraussetzungen für diese Zielsetzung.

[0050] Im folgenden wird nun die Modellbildung der Tauchbewegung näher dargestellt:

Um die Tauchbewegung der Lastaufhängung vorhersagen zu können, gilt es diese Bewegung zu modellieren. Wie auch schon bei der Messung der Bewegung des Schiffs angenommen wurde, kann die Tauchbewegung als eine periodische Bewegung angesehen werden. Ihr Modell wird somit aus einer Überlagerung von N_M Sinusschwingungen, welche im Weiteren als Moden bezeichnet werden, gebildet. Dabei wird jede Mode vollständig durch ihre Amplitude $A_{M,k}$, Kreisfrequenz $\omega_{M,k}$ und Phase $\phi_{M,k}$ beschrieben. Zudem ist dem Modell noch ein statischer Offset $z_{LA,off}$ hinzuzufügen, da sich die Ruhelage der Tauchbewegung nicht im Ursprung der z-Achse des Weltkoordinatensystems befinden muss. Die modellierte Tauchbewegung der Lastaufhängung z_{LA} wird somit, mit der Wahl des Startzeitpunktes $t_0 = 0$, ohne Beschränkung der Allgemeinheit wie folgt beschrieben:

$$z_{LA}(t) = \sum_{k=1}^{N_M} z_{LA,k}(t) + z_{LA,off} = \sum_{k=1}^{N_M} A_{M,k} \sin(\omega_{M,k}t + \phi_{M,k}) + z_{LA,off} \quad 5.1$$

[0051] Da dieses Modell der Tauchbewegung, wie oben schon kurz angesprochen, in einem Zustandbeobachter zum Einsatz kommen soll, ist es notwendig daraus ein Zustandsmodell zu erzeugen.

Lineares Zustandsmodell der Tauchbewegung

[0052] Für den linearen Beobachter wird eine Modellstruktur angestrebt, die der in Gleichung 5.2 dargestellten, allgemeinen Beschreibung eines linearen Systems ohne direkten Durchgriff entspricht.

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}} &= \underline{A}\underline{x} + \underline{B}\underline{u}, & \underline{x}(0) &= \underline{x}_0, & \underline{x} &\in \mathbb{R}^n, \underline{u} \in \mathbb{R}^p \\ \underline{y} &= \underline{C}\underline{x}, & & & \underline{y} &\in \mathbb{R}^m \end{aligned} \quad 5.2$$

[0053] Dabei bezeichnet $\underline{x}$ den Vektor der Zustände des Systems der Ordnung n mit den Anfangsbedingungen $\underline{x}_0$ zur Zeit t_0 , welche ohne die Allgemeingültigkeit zu beschränken zu Null gewählt sind. $\underline{u}$ steht für die p Eingänge des Systems. Die Matrix $\underline{A}$ wird als Systemmatrix, $\underline{B}$ als Steuermatrix und $\underline{C}$ als Messmatrix bezeichnet. $\underline{y}$ charakterisiert den Systemausgang, der aus m unterschiedlichen Messsignalen besteht. Wird eine einzelne Mode $z_{LA,k}$ aus Gleichung 5.1 als lineares Differentialgleichungssystem analog Gleichung 5.2 dargestellt, so ist diese als freie, ungedämpfte Schwingung zu modellieren. Mit der Wahl der Zustände

$$\begin{aligned} \underline{x}_k &= \begin{bmatrix} x_{1,k} & x_{2,k} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} z_{LA,k} & \dot{z}_{LA,k} \end{bmatrix}^T, & k &= 1, \dots, N_M \\ &= \begin{bmatrix} A_{M,k} \sin(\omega_{M,k}t + \phi_{M,k}) \\ \omega_{M,k} A_{M,k} \cos(\omega_{M,k}t + \phi_{M,k}) \end{bmatrix}, & k &= 1, \dots, N_M \end{aligned} \quad 5.3 \quad 5.4$$

resultiert ein autonomes System mit nur einem Ausgang, dessen Systemgleichung wie folgt aufzustellen ist:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_k &= \underline{A}_k \underline{x}_k = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{M,k}^2 & 0 \end{bmatrix} \underline{x}_k & \underline{x}_{D,k} &= \begin{bmatrix} A_{M,k} \sin(\phi_{M,k}) \\ \omega_{M,k} A_{M,k} \cos(\phi_{M,k}) \end{bmatrix} \\ y_k &= \underline{C}_k \underline{x}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \underline{x}_k, & k &= 1, \dots, N_M \end{aligned} \quad 5.5$$

[0054] Der skalare Ausgang y_k beschreibt dabei die k -te Mode. Werden die einzelnen Moden aufaddiert und der statische Offset als letzter Zustand der Systembeschreibung dem Modell hinzugefügt, so setzt sich das lineare Modell der Tauchbewegung der Lastaufhängung wie folgt aus den einzelnen Moden gemäß Gleichung 5.5 zusammen:

$$\begin{aligned}
 \dot{\underline{x}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \underline{0} & \dots & \dots & 0 \\ \underline{0} & \underline{A}_2 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \underline{A}_{N_M} & 0 \\ \underline{0} & \dots & \dots & \underline{0} & 0 \end{bmatrix}}_{\underline{A}} \underline{x} & \quad \underline{x}_0 = \begin{bmatrix} \underline{x}_{0,1} \\ \underline{x}_{0,2} \\ \vdots \\ \underline{x}_{0,N_M} \\ z_{LA,off} \end{bmatrix} \\
 y &= \underbrace{\begin{bmatrix} \underline{C}_1 & \underline{C}_2 & \dots & \underline{C}_{N_M} & 1 \end{bmatrix}}_{\underline{C}} \underline{x}
 \end{aligned}$$

5.6

[0055] Dabei ist zu beachten, dass der Systemausgang y in Gleichung 5.6 so gewählt ist, dass dieser die Tauchbewegung des Lastaufhängepunktes beschreibt.

[0056] Ein allgemeines, nichtlineares SISO-System ohne direkten Durchgriff wird als Zustandsmodell durch folgendes Differentialgleichungssystem beschrieben:

$$\begin{aligned}
 \dot{\underline{x}} &= \underline{f}(\underline{x}, u), & t > 0, & \quad \underline{x}(0) = \underline{x}_0, & \quad \underline{x} \in \mathcal{M}_n \subseteq \mathbb{R}^n, & \quad u \in \mathcal{U}_1 \subseteq \mathbb{R}^1 \\
 y &= h(\underline{x}), & t \geq 0, & \quad \underline{y} \in \mathcal{Y}_1 \subseteq \mathbb{R}^1
 \end{aligned}$$

5.7

[0057] Dabei steht n für die Ordnung des Systems mit dem Ausgang y . Die Zustände x und ihre Anfangsbedingungen x_0 befinden sich dabei in dem natürlichen Arbeitsraum eines nichtlinearen Systems $\mathcal{M}_n$, der durch die n -dimensionale Mannigfaltigkeit beschrieben wird. Der Eingang des Systems u liegt dabei in der zulässigen Menge der Eingangsfunktionen $\mathcal{U}_1$. Die Dynamik des Systems wird durch das Vektorfeld $f(x)$ beschrieben, welches somit das nichtlineare Analogon der Systemmatrix A der linearen Systeme ist. $h(x)$ steht für die Ausgangsfunktion des Systems und kann mit der Messmatrix C der linearen Systeme verglichen werden. Soll die Tauchbewegung des Lastaufhängepunktes gemäß der Gleichung 5.1 in der gerade beschriebenen Form angegeben werden, so empfiehlt es sich wiederum zunächst nur eine einzelne Mode zu betrachten. Mit der nachfolgend gewählten Definition der Zustände

$$\begin{aligned}
 \underline{x}_k &= \begin{bmatrix} x_{1,k} & x_{2,k} & x_{3,k} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} z_{LA,k} & \dot{z}_{LA,k} & \omega_{M,k} \end{bmatrix}^T, & \quad k = 1, \dots, N_M \\
 &= \begin{bmatrix} A_{M,k} \sin(\omega_{M,k} t + \phi_{M,k}) \\ \omega_{M,k} A_{M,k} \cos(\omega_{M,k} t + \phi_{M,k}) \\ \omega_{M,k} \end{bmatrix}, & \quad k = 1, \dots, N_M
 \end{aligned}$$

5.8 5.9

ergibt sich das autonome nichtlineare Modell der k -ten Mode zu:

$$\begin{aligned}
 \dot{\underline{x}}_k &= \underline{f}_k(\underline{x}_k) = \begin{pmatrix} x_{2,k} \\ -x_{1,k} x_{3,k}^2 \\ 0 \end{pmatrix}, & \quad \underline{x}_{0,k} = \begin{bmatrix} A_{M,k} \sin(\phi_{M,k}) \\ \omega_{M,k} A_{M,k} \cos(\phi_{M,k}) \\ \omega_{M,k} \end{bmatrix} \\
 y_k &= h_k(\underline{x}_k) = x_{1,k} & \quad k = 1, \dots, N_M
 \end{aligned}$$

5.10

[0058] Das vollständige, nichtlineare Modell der Tauchbewegung des Lastaufhängepunktes resultiert wiederum aus der Zusammenführung der Modelle der Einzelmoden aus Gleichung 5.10 und der Einführung eines Offset-Zustands. Wird dieser als letzter und somit $3N_M + 1$ -ster Zustand in das Modell eingebunden, so lautet die Beschreibung des Gesamtsystems wie folgt:

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}) = \begin{pmatrix} f_1(\underline{x}_1) \\ \vdots \\ f_{N_M}(\underline{x}_{N_M}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad \underline{x}_0 = \begin{pmatrix} \underline{x}_{0,1} \\ \vdots \\ \underline{x}_{0,N_M} \\ z_{LA,off} \end{pmatrix}$$

$$y = h(\underline{x}) = \sum_{k=1}^{N_M} h_k(\underline{x}_k) + x_{3N_M+1}$$

5.11

[0059] Der einzige Ausgang des Gesamtsystems ist dabei so gewählt, dass dieser die Tauchbewegung der Lastaufhängung beschreibt.

Modellidentifikation und Vorparametrierung

[0060] Ziel der Modellidentifikation ist es die Grundstruktur des Modells der Tauchbewegung zu bestimmen. Da diese bis auf die Anzahl der Moden bereits vorgegeben ist, gilt es lediglich deren Anzahl zu ermitteln. Die Vorparametrierung des Modells hat die Aufgabe die Parameter des identifizierten Modells möglichst zutreffend anzupassen.

[0061] Wird Gleichung 5.1 betrachtet, so ist die Tauchbewegung mit der Kenntnis der Parameter N_M , $A_{M,k}$, $\omega_{M,k}$, $\phi_{M,k}$ und $z_{LA,off}$ vollständig beschrieben. Die Anzahl der zu bestimmenden Parameter ergibt sich somit zu $3N_M + 2$. Damit ist sie linear abhängig von der Anzahl der Sinusschwingungen, welche zur Nachbildung der Tauchbewegung benötigt werden. Die Ermittlung von N_M ist folglich die erste und wichtigste Aufgabe, da sie der Modellidentifikation gleicht. Ist die Anzahl der Moden, und somit das Modell der Tauchbewegung erst einmal bekannt, so können nach und nach die restlichen $3N_M + 1$ Parameter adaptiert werden.

[0062] Die Identifikation und Vorparametrierung des Modells der Tauchbewegung wird an Hand der gemessenen, vertikalen Bewegung des Lastaufhängepunktes durchgeführt. Die strukturelle Vorgehensweise ist in Figur 5 dargestellt. Die Bestimmung der notwendigen Anzahl der Moden N_M beruht dabei auf einer online durchgeführten, diskreten Fourier-Analyse der gemessenen Tauchbewegung zum Zeitpunkt t_i und anschließender Auswertung.

[0063] Die signifikanten Frequenzen der Tauchbewegung werden an Hand des Amplitudengangs ermittelt. Diese Auswertung des Amplitudengangs erfolgt zur Laufzeit der Messung mittels der Spitzenerkennung. Neben der Anzahl der für die Modellidentifikation zu verwendenden Moden $N_{M,DFT}$ liefert die Spitzenerkennung die Frequenzen der erkannten Moden $\omega_{M,DFT,k}$ die zu dem Vektor $\omega_{M,DFT}$ zusammengefasst sind, und eine erste Schätzung des Vektors der Amplituden $A_{M,DFT}$. Die Phasen der Moden $\phi_{M,DFT}$ werden anschließend separat aus dem Phasengang der diskreten Fourier-Transformation bestimmt. Wird das Modell mit diesen Parametern versehen, so liefert es die modellierte Tauchbewegung im Zeitbereich zwischen t_0 und T , welche mit $z_{LA,DFT}$ bezeichnet ist.

[0064] Mittels diskreter Fourier-Transformation (DFT) wird aus $z_{LA}(t)$ über das zeitdiskrete Signal $z_{LA,n}$ der Amplitudengang $A_{DFT,i}$ und der Phasengang $\phi_{DFT,i}$ bestimmt. Z.B. kann die diskrete Fourier-Transformation alle 10 s auf die reale Tauchbewegung der Lastaufhängung angewandt werden.

Spitzenerkennung

[0065] Das mit der diskreten Fourier-Transformation online bestimmte Amplitudenspektrum der Tauchbewegung des Lastaufhängepunktes gilt es nun mit Hilfe der Spitzenerkennung auszuwerten. Dabei können nahezu alle Informationen, die zur Identifikation und Vorparametrierung des Modells der Tauchbewegung notwendig sind, daraus gewonnen werden.

Ziele der Spitzenerkennung

[0066] Die Hauptaufgabe der Spitzenerkennung ist es das Zustandsmodell der Tauchbewegung zu identifizieren.

[0067] Dies umfasst die folgenden Ziele:

- Online-Identifikation des Modells der Tauchbewegung
- Bestimmung der Anzahl der Moden $N_{M,SE}$
- Modellbildung unter Berücksichtigung der maximalen Anzahl der Moden $N_{M,Max}$
- Online-Parametrierung des Modells der Tauchbewegung

- Bestimmung der Amplituden $A_{M,DFT}$ der Moden
- Bestimmung der Kreisfrequenzen $\omega_{M,DFT}$ der Moden

[0068] Die Problemstellung der Detektion der Moden wird beispielhaft durch eine auf den Amplitudengang angewandte MiniMax-Aufgabe mit Nebenbedingung gelöst. Als Nebenbedingung kommt dabei eine so genannte Grenzfolge zum Einsatz. Sie bestimmt die minimale Amplitude, welche ein Maximum überschreiten muss, damit dieses als Mode erkannt wird. Die Festlegung der Amplitude der Grenzfolge $A_{DFT,Grenz,i}$ erfolgt dabei adaptiv in Abhängigkeit des jeweiligen Amplitudenspektrums der aktuellen Tauchbewegung gemäß nachfolgender Gleichung:

$$A_{DFT,Grenz,i} = \underbrace{c_{Grenz} A_{DFT,Max}}_{\text{Offsetverschiebung}} + \underbrace{\frac{1}{6} \left(\sum_{j=1}^3 A_{DFT,j} + A_{DFT,-j} \right)}_{\text{Mittelwertbildung}} \quad i = 4, 5, \dots, \frac{N_{DFT}}{2} \quad 5.23$$

[0069] Strukturell berechnet sich diese somit aus einer Offsetverschiebung und einer Mittelwertbildung. Die Offsetverschiebung definiert eine über das gesamte Frequenzspektrum konstante, minimale Amplitude der Grenzfolge. Sie bildet sich aus dem Produkt zwischen dem frei wählbaren Entwurfparameter c_{Grenz} und dem absoluten Maximum des Amplitudengangs $A_{DFT,Max}$, welches analog Gleichung 5.24 bestimmt wird.

$$A_{DFT,Max} = \max\{A_{DFT,i}\}, \quad i = 1, 2, \dots, \frac{N_{DFT}}{2} \quad 5.24$$

[0070] Der zweite Teil ist eine gleitende Mittelwertbildung angewandt auf ein beschränktes Frequenzband des Amplitudenspektrums. Der hierfür verwendete Filter ist dabei ähnlich den bei der Bildverarbeitung eingesetzten Filtern entworfen. Da es auf Grund der Mittelwertbildung nicht möglich ist die ersten vier Amplitudenwerte der Grenzfolge analog der aufgezeigten Gleichung zu berechnen, sind diese separat zu bestimmen. Der Einfachheit halber wurden diese entsprechend der letzten bestimmbar Amplitude gewählt, womit sich die Anfangswerte der Grenzfolge zu

$$A_{DFT,Grenz,i} = A_{DFT,Grenz,4} \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad 5.25$$

ergeben. Die lokalen Maxima des Amplitudengangs der Tauchbewegung werden durch eine diskrete Differentiation dieses ermittelt. Eine Spitze des Amplitudengangs an der Stelle i wird somit als solche erkannt, wenn gilt:

$$(A_{DFT,i} - A_{DFT,i-1} > 0) \wedge (A_{DFT,i+1} - A_{DFT,i} < 0), \quad i = 1, \dots, \frac{N_{DFT}}{2} - 1 \quad 5.26$$

[0071] Überschreitet die Amplitude der so detektierten Spitze zudem die Amplitude der Grenzfolge, ist diese als Mode $M_{SE,i}$ erkannt. Die Menge aller Moden $M_{M,SE}$ bestimmt sich somit wie folgt:

$$M_{M,SE} = \{M_{SE,i} \mid (A_{DFT,i} - A_{DFT,i-1} > 0) \wedge \dots \wedge (A_{DFT,i+1} - A_{DFT,i} < 0) \wedge \dots \wedge (A_{DFT,i} > A_{DFT,Grenz,i})\}, \quad i = 1, \dots, \frac{N_{DFT}}{2} - 1 \quad 5.27$$

[0072] Die zu bestimmende Anzahl der Moden $N_{M,SE}$ kann nun aus der Kardinalität der Menge $M_{M,SE}$ ermittelt werden.

$$N_{M,SE} = |M_{M,SE}| \quad 5.28$$

[0073] Ist die Anzahl der detektierten Moden $N_{M,SE}$ bestimmt, so gilt es zu überprüfen, ob diese kleiner oder gleich der gewählten maximalen Anzahl der Moden $N_{M,Max}$ ist. Tritt dieser Fall ein, so ist ein Modell der Tauchbewegung zu verwenden, das $N_{M,SE}$ Moden berücksichtigt. Ansonsten wird die Anzahl der berücksichtigten Moden auf $N_{M,Max}$ begrenzt, womit sich die für die Modellbildung verwendete Anzahl der Moden $N_{M,DFT}$ folgendermaßen bestimmt:

$$N_{M,DFT} = \min \{N_{M,SE}, N_{M,Max}\} \quad 5.29$$

[0074] Werden zur Modellierung der Tauchbewegung die Modelle nach Gleichung 5.1, 5.6 bzw. 5.11 verwendet, so sind diese mit der Kenntnis der zu berücksichtigenden Anzahl der Moden vollständig identifiziert.

[0075] Die Vorparametrierung der Modelle ist nun mit der Menge der für die Modellidentifikation verwendeten Moden $M_{M,DFT}$ durchzuführen. Diese ist gleich der Menge der detektierten Moden $M_{M,SE}$, falls $N_{M,SE} \leq N_{M,Max}$ ist. Ansonsten ist sie diejenige Teilmenge, welche die $N_{M,Max}$ Moden mit der größten Amplitude enthält.

[0076] Die Amplitude der k-ten Mode $A_{M,SE,k}$ ist dabei durch dessen Wert im Amplitudengang bestimmt. Wie schon bei der Einführung des Amplitudengangs erklärt, ist sie im Frequenzspektrum auf zwei Punkte mit identischer Höhe verteilt. Sie ergibt sich somit zu

$$A_{M,SE,k} = 2A_{DFT,i} \quad \forall i \in \{i \mid M_{SE,i} \in M_{M,SE}\} \quad i = 0, 1, \dots, \frac{N_{DFT}}{2} \quad 5.30$$

und die Amplituden der Moden des Modells zu

$$A_{M,DFT,k} = 2A_{DFT,i} \quad \forall i \in \{i \mid M_{SE,i} \in M_{M,DFT}\} \quad i = 0, 1, \dots, \frac{N_{DFT}}{2} \quad 5.31$$

[0077] Die Selektion der dominanten Moden wird, im Rahmen der vorliegenden Arbeit, durch einen auf die Amplituden der Moden angewandten Sortieralgorithmus durchgeführt. Dabei gilt zu beachten, dass durch das Umsortieren der Moden die Zuordnung zwischen der Amplitude, Frequenz und Phase einer Mode nicht verloren geht. Als letzte Aufgabe der Spitzenerkennung gilt es noch die Kreisfrequenzen $\omega_{M,DFT}$ der Moden zu ermitteln. Diese werden an Hand der Frequenzachse des Amplitudenspektrums mit folgender Umrechnung bestimmt:

$$\omega_{M,DFT,k} = 2\pi f_{DFT,i} \quad \forall i \in \{i \mid M_{DFT,i} \in M_{M,DFT}\} \quad i = 0, 1, \dots, \frac{N_{DFT}}{2} \quad 5.32$$

Bestimmung des statischen Offsets

[0078] Für die Bestimmung des statischen Offsets der Tauchbewegung des Lastaufhängepunktes ist wiederum der online ermittelte Amplitudengang dieser Bewegung heran zu ziehen. Der Gleichanteil der für die diskrete Fourier-Transformation bereitgestellten Folge der Messdaten entspricht dabei dem ersten Wert des Amplitudengangs. Für die mathematische Begründung ist Gleichung 5.16 zu verwenden. Wird i zu Null gewählt, womit der erste Wert des Amplitudengangs berechnet wird, resultiert:

$$z_{LA,off,DFT} = A_{DFT,0} = \frac{1}{N_{DFT}} \sum_{n=0}^{N_{DFT}-1} z_{LA,n} \quad 5.33$$

[0079] Dies entspricht dem arithmetischen Mittel der aufsummierten Folge der Messdaten und somit dem statischen Offset der Tauchbewegung im betrachteten Zeitintervall.

Phasenbestimmung

[0080] Die Bestimmung der Phasen der einzelnen Moden schließt die Vorparametrierung des Modells der Tauchbewegung ab. Sie werden durch Auswertung des Phasengangs ermittelt.

[0081] Für die Bestimmung der Phase ist eine Rücktransformation der Bildfolge in den Zeitbereich durchzuführen.

Wird die komplette Bildfolge der gemessenen Tauchbewegung $z_{LA,i}$ durch Anwendung der Transformationsvorschrift nach Gleichung 5.15 in den Zeitbereich überführt, so resultiert der Startwert der Tauchbewegung $z_{LA,0}$ zu:

$$z_{LA,0} = z_{LA}(0) = \frac{1}{N_{DFT}} \sum_{i=0}^{N_{DFT}-1} Z_{LA,i} \quad 5.34$$

[0082] Für eine einzelne Mode vereinfacht sich dieser Ausdruck gravierend und lässt sich letztendlich in Abhängigkeit eines einzigen Wertes des Amplitudengangs $ADFT,i$ und des Phasengangs $\phi_{DFT,i}$ darstellen. Diese Vereinfachung basiert auf der Eigenschaft, dass im Bildbereich der Fourier-Transformation eine reine Sinusschwingung durch ein komplex konjugiertes Zahlenpaar beschrieben wird, dessen Werte an der i-ten und $N_{DFT} - i$ -ten Position der Folge lokalisiert sind. Zur Verdeutlichung der weiteren Schritte ist dieses Zahlenpaar in Figur 6 (Darstellung des i-ten Werts der Bildfolge und dessen komplex konjugiertem Wert an der Stelle $N_{DFT} - i$) dargestellt.

[0083] Die Startwerte $z_{LA,0,k}$ der $N_{M,DFT}$ Moden werden somit durch nachfolgende Gleichungen bestimmt:

$$\begin{aligned} z_{LA,k,0} &= \frac{1}{N_{DFT}} (Z_{LA,i} + Z_{LA,N_{DFT}-i}) \\ &= \frac{1}{N_{DFT}} (Z_{LA,i} + \overline{Z_{LA,i}}) & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \\ &= \frac{2}{N_{DFT}} \operatorname{Re}(Z_{LA,i}) & i &\in \{i \mid M_{DFT,i} \in \mathbb{M}_{M,DFT}\} \\ &= 2A_{DFT,i} \cos(\phi_{DFT,i}), \end{aligned} \quad 5.35$$

[0084] Werden die auf diese Weise bestimmten Startwerte der Moden der Tauchbewegung mit den folgenden Startwerten

$$z_{LA,k}(0) = \underbrace{A_{M,DFT,k}}_{=2A_{DFT,i} \text{ vgl. Gl.5.30}} \sin(\phi_{M,DFT,k}), \quad k = 1, \dots, N_{M,DFT} \quad 5.36$$

aus Gleichung 5.1 verglichen, so resultieren die gesuchten Phasen der Moden $\phi_{M,DFT}$ zum Zeitpunkt t_0 zu

$$\phi_{M,DFT,k} = \phi_{DFT,i} + \frac{\pi}{2}, \quad i \in \{i \mid M_{DFT,i} \in \mathbb{M}_{M,DFT}\}. \quad 5.37$$

Beobachtergestützte Adaption der Modellparameter

[0085] Für die Adaption von Amplitude, Phase und ggf. der Frequenz werden beobachtergestützte Ansätze verfolgt. Ein Beobachter hat stets die Aufgabe aus den gemessenen Ausgangsgrößen einer Strecke mit Sensorik den vollständigen Zustand dieser Strecke zu schätzen. Der gesuchte Zustand x wird dabei mit Hilfe eines Modells der Strecke bestimmt, das an Hand der Differenzen zwischen den realen y und simulierten $\hat{y}$ Ausgangssignalen korrigiert wird. In Figur 7 ist dabei ein Signalfussdiagramm eines solchen Beobachters gezeigt.

Linearer Beobachterentwurf

[0086] Der lineare Beobachterentwurf basiert auf dem Zustandsmodell der Tauchbewegung nach Gleichung 5.6. Das lineare Kalman-Bucy-Filter zählt zu den am meisten verwendeten Beobachtern welche auf der Struktur des Luenberger-Beobachters aufbauen. Für den Beobachterentwurf müssen das Systemrauschen $w(t)$ und das Messrauschen $v(t)$ berücksichtigt werden, womit folgendes Modell für den Entwurfsprozess zu verwenden ist:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}} &= \underline{A}\underline{x} + \underline{B}\underline{u} + \underline{w}(t), & \underline{x}(0) &= \underline{x}_0, & \underline{x} &\in \mathbb{R}^n, \underline{w}(t) \in \mathbb{R}^n, \underline{u} \in \mathbb{R}^p \\ \underline{y} &= \underline{C}\underline{x} + \underline{v}(t), & & & \underline{y} &\in \mathbb{R}^m, \underline{v}(t) \in \mathbb{R}^m \end{aligned} \quad 5.55$$

[0087] Dabei wird vorausgesetzt, dass die Rauschsignale stationär, mittelwertfrei, normalverteilt und zugleich unkorreliert sind. Für dieses Rauschen gilt

$$\begin{aligned} E \{ \underline{w}(t_1) \underline{w}^T(t_2) \} &= \text{cov} \{ \underline{w}(t_1) \underline{w}^T(t_2) \} = \underline{Q} \delta(t_1 - t_2) \\ E \{ \underline{v}(t_1) \underline{v}^T(t_2) \} &= \text{cov} \{ \underline{v}(t_1) \underline{v}^T(t_2) \} = \underline{R} \delta(t_1 - t_2), \end{aligned} \quad 5.56 \quad 5.57$$

womit die Kovarianzmatrizen Q und R eindeutig durch die Rauschsignale beschreiben werden. Diese ergeben sich zu konstanten, symmetrischen Matrizen. Damit ergeben sich die folgenden Gleichungen für den Beobachter:

$$\dot{\hat{\underline{x}}} = \underbrace{\underline{A}\hat{\underline{x}} + \underline{B}u}_{\text{Simulationsteil}} + \underbrace{\underline{L}(y - \hat{y})}_{\text{Korrekturteil}} = (\underline{A} - \underline{L}\underline{C})\hat{\underline{x}} + \underline{B}u + \underline{L}y, \quad \hat{\underline{x}}_0 = E\{\underline{x}_0\} \quad 5.58$$

[0088] Die Korrekturmatri L des linearen Kalman-Bucy-Filters berechnet sich durch Lösen des nachfolgenden quadratischen Gütekriteriums:

$$\begin{aligned} \underline{L} &= \underline{P} \underline{C}^T \underline{R}^{-1} \\ \underline{Q} &= \underline{P} \underline{C}^T \underline{R}^{-1} \underline{C} \underline{P} - \underline{A} \underline{P} - \underline{P} \underline{A}^T - \underline{Q} \end{aligned} \quad 5.59 \quad 5.60$$

[0089] Das Modell des linearen Kalman-Bucy-Filters ist dann:

$$\dot{\hat{\underline{x}}} = \left(\begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \underline{0} & \dots & \dots & 0 \\ \underline{0} & \underline{A}_2 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \underline{A}_{N_{M,DFT}} & 0 \\ \underline{0} & \dots & \dots & \underline{0} & 0 \end{bmatrix} - \underline{L} \begin{bmatrix} \underline{C}_1 & \underline{C}_2 & \dots & \underline{C}_{N_{M,DFT}} & 1 \end{bmatrix} \right) \hat{\underline{x}} + \underline{L}y \quad 5.61$$

[0090] Die einzelnen Blockmatrizen, aus denen die Systemmatrix A und die Messmatrix C aufgebaut sind, lauten analog Gleichung 5.5:

$$\begin{aligned} \underline{A}_k &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{M,DFT,k}^2 & 0 \end{bmatrix}, & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \\ \underline{C}_k &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \end{aligned} \quad 5.62 \quad 5.63$$

[0091] Als Ausgang der Strecke y wird die Teilfolge der gespeicherten Messdaten der Tauchbewegung verwendet, die dem gewählten Beobachtungsintervall entspricht, womit

$$y(t) = z_{LA,n}(t_i), \quad t_n = t_0 + n\Delta T_{DFT} \quad t_{0,Obs} \leq t_n \leq T \quad 5.64$$

ist.

[0092] Für ein rasches Einschwingverhalten des Beobachters sind diesem möglichst zutreffende Anfangsbedingungen $\hat{x}_0$ für den Zeitpunkt $t_{0,Obs}$ zu übergeben. Diese berechnen sich aus den mit der diskreten Fourier-Transformation bestimmten Parametern der einzelnen Moden und dem statischen Offset wie folgt:

$$\hat{\underline{x}}_0 = \hat{\underline{x}}(t_{0,Obs}) = \begin{bmatrix} \hat{\underline{x}}_{0,1} \\ \hat{\underline{x}}_{0,2} \\ \vdots \\ \hat{\underline{x}}_{0,N_{M,DFT}} \\ \hat{z}_{LA,off,DFT} \end{bmatrix}$$

5.65

[0093] Mit:

$$\hat{\underline{x}}_{0,k} = \begin{bmatrix} A_{M,DFT,k} \sin(\omega_{M,DFT,k} t_{0,Obs} + \phi_{M,DFT,k}) \\ \omega_{M,DFT,k} A_{M,DFT,k} \cos(\omega_{M,DFT,k} t_{0,Obs} + \phi_{M,DFT,k}) \end{bmatrix}, \quad k = 1, \dots, N_{M,DFT}$$

5.66

[0094] Für die Berechnung von L werden nun die Entwurfsparameter Q und R symmetrisch und positiv definit gewählt. Ihre Dimensionen ist dabei durch die Anzahl der Systemzustände und der Ausgänge des Beobachtermodells bestimmt. Folglich ist Q als eine $(2N_{M,DFT} + 1 \times 2N_{M,DFT} + 1)$ -Matrix und R als ein Skalar zu wählen. Werden nur die Diagonalelemente der Kovarianzmatrix Q beschrieben, kann auf Grund der vorherrschenden Struktur der Systemmatrix A die Dynamik der Fehlerkorrektur für jede Mode separat vorgegeben werden. Je größer die Spur der k-ten Blockmatrix Q gewählt wird, desto schneller erfolgt eine Korrektur der entsprechenden Abweichungen der Zustände $\hat{x}_k$ der Mode. Der Entwurfsparameter R beeinflusst hingegen die Dynamik aller Zustände gleichermaßen. Je kleiner R gewählt wird, desto dynamischer reagiert der Beobachter auf Abweichungen zwischen der gemessenen und simulierten Tauchbewegung.

[0095] Die für die Schätzung der einzelnen Moden der Tauchbewegung verwendete Kovarianzmatrix Q dieser Arbeit ist gemäß nachfolgender Gleichung aufgebaut.

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} \underline{Q}_1 & \underline{0} & \dots & \dots & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{Q}_2 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \underline{Q}_{N_{M,DFT}} & \underline{0} \\ \underline{0} & \dots & \dots & \underline{0} & c_{off} \end{bmatrix}$$

5.67

[0096] Die einzelnen Blockmatrizen $\underline{Q}_k$ sind wiederum als Diagonalmatrizen aufgebaut und bestimmen sich wie folgt:

$$\underline{Q}_k = \begin{bmatrix} c_k & 0 \\ 0 & c_k \end{bmatrix}, \quad k = 1, \dots, N_{M,DFT}$$

5.68 5.69

[0097] Der Faktor c_k der Kovarianzmatrizen $\underline{Q}_k$ wird in Abhängigkeit der Kreisfrequenz der zugehörigen Mode bestimmt.

Tabelle 5.2: Einträge der Kovarianzmatrix $\underline{Q}$ in Abhängigkeit der Kreisfrequenz $\omega_{M,DFT,k}$

$\omega_{Min} \leq \omega_{M,DFT,k} < \omega_{Max}$							
$\omega_{Min} [rad/s]$	$\omega_{Max} [rad/s]$	$\omega_{Min} [rad/s]$	$\omega_{Max} [rad/s]$	$\omega_{Min} [rad/s]$	$\omega_{Max} [rad/s]$	$\omega_{Min} [rad/s]$	$\omega_{Max} [rad/s]$
0	$\frac{2\pi}{40}$	$\frac{2\pi}{40}$	$\frac{2\pi}{20}$	$\frac{2\pi}{20}$	$\frac{2\pi}{10}$	$\frac{2\pi}{10}$	∞
$c_k = 0,001$		$c_k = 0,01$		$c_k = 0,5$		$c_k = 3$	

Nichtlinearer Beobachterentwurf

[0098] Für den nichtlinearen Beobachterentwurf ist das Zustandsmodell der Tauchbewegung, wie es in Gleichung 5.11 angegeben ist, zu verwenden. Das Erweiterte Kalman-Filter ist eine für nichtlineare Systeme erweiterte Variante des linearen Kalman-Bucy-Filters. Als Basis des Beobachterentwurfs ist somit das nichtlineare SISO-System nach Gleichung 5.7 wie folgt zu formulieren:

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}} &= \underline{f}(\underline{x}, u) + \underline{w}(t), & \underline{x}(0) &= \underline{x}_0, & \underline{x} &\in \mathcal{M}_n \subseteq \mathbb{R}^n, \underline{w}(t) \in \mathbb{R}^n, u \in \mathcal{U}_1 \subseteq \mathbb{R} \\ \underline{y} &= \underline{h}(\underline{x}) + v(t), & & & \underline{y} &\in \mathcal{Y}_1 \subseteq \mathbb{R}, v(t) \in \mathbb{R}\end{aligned}\quad 5.95$$

[0099] Die Beschreibung der Kovarianzmatrizen Q und R erfolgt dabei wiederum gemäß der Gleichungen 5.56 und 5.57 durch die Rauschprozesse, welche als stationär, mittelwertfrei, normalverteilt und zugleich unkorreliert angenommen werden.

$$\begin{aligned}\mathbb{E}\{\underline{w}(t_1)\underline{w}^T(t_2)\} &= \text{cov}\{\underline{w}(t_1)\underline{w}^T(t_2)\} = \underline{Q} \delta(t_1 - t_2) \\ \mathbb{E}\{v(t_1)v^T(t_2)\} &= \text{cov}\{v(t_1)v^T(t_2)\} = \underline{R} \delta(t_1 - t_2),\end{aligned}\quad 5.96 \quad 5.97$$

[0100] Ist das System- oder Messrauschen nicht bekannt, so sind diese beiden Matrizen als Entwurfsparameter zu verwenden. Das zu Gleichung 5.95 gehörige Erweiterte Kalman-Filter wird durch nachfolgendes, nichtlineares Differentialgleichungssystem beschrieben:

$$\dot{\hat{\underline{x}}} = \underbrace{\underline{f}(\hat{\underline{x}}, u)}_{\text{Simulationsteil}} + \underbrace{\underline{L}(t)(y - \hat{y})}_{\text{Korrekturteil}} = \underline{f}(\hat{\underline{x}}, u) + \underline{L}(t)(y - \underline{h}(\hat{\underline{x}})), \quad \hat{\underline{x}}_0 = \mathbb{E}\{\underline{x}_0\}\quad 5.98$$

[0101] Für diese Beobachterdifferentialgleichung, mit dem rauschfreien Simulationsteil und dem Korrekturteil r, gilt es die zeitvariante Korrekturmatri L(t) zu bestimmen. Diese errechnet sich in Abhängigkeit der Kovarianzmatrizen Q und R aus nachfolgender Matrix-Riccati-Differentialgleichung.

$$\begin{aligned}\underline{L} &= \underline{P} \underline{H}^T \underline{R}^{-1}, & \underline{H}(t) &= \left. \frac{\partial \underline{h}}{\partial \underline{x}} \right|_{\hat{\underline{x}}(t)} \\ \dot{\underline{P}} &= \underline{F} \underline{P} + \underline{P} \underline{F}^T + \underline{Q} - \underline{P} \underline{H}^T \underline{R}^{-1} \underline{H} \underline{P}, & \underline{F}(t) &= \left. \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{x}} \right|_{\hat{\underline{x}}(t)}\end{aligned}\quad 5.99 \quad 5.100$$

[0102] Mit der Wahl der Anfangsbedingung P₀ der Kovarianzmatrix P zu

$$\underline{P}(0) = \underline{P}_0 = \mathbb{E}\{(\hat{\underline{x}}_0 - \underline{x}_0)(\hat{\underline{x}}_0 - \underline{x}_0)^T\}\quad 5.101$$

ist das Erweiterte Kalman-Filter vollständig bestimmt.

[0103] Für die Realisation des Erweiterten Kalman-Filters ist es folglich erforderlich die n nichtlinearen Filtergleichungen zu integrieren. Zudem sind für die Bestimmung der Korrekturmatri die Jacobi-Matrizen H(t) und F(t) zu berechnen, als auch die n(n+ 1)/2 Differentialgleichungen der symmetrischen Kovarianzmatrix P zu lösen. All dies hat online zu erfolgen, wodurch der benötigte Rechenaufwand mit der Ordnung des Systems stark zunimmt. Die Filter-Differentialgleichungen nach 5.98 ergeben sich durch einsetzen des online identifizierten, nichtlinearen Modells der Tauchbewegung 5.11 zu:

$$\dot{\underline{x}} = \begin{pmatrix} \underline{f}_1(\underline{x}_1) \\ \vdots \\ \underline{f}_{N_{M,DFT}}(\underline{x}_{N_{M,DFT}}) \\ 0 \end{pmatrix} + \underline{L}(t) \left(y - \left(\sum_{k=1}^{N_{M,DFT}} h_k(\underline{x}_k) + x_{3N_{M,DFT}+1} \right) \right) \quad 5.102$$

[0104] Die einzelnen Vektorfelder $\underline{f}(\underline{x}_k)$ der $N_{M,DFT}$ detektierten Moden und die Ausgangsfunktionen $h_k(\underline{x}_k)$ sind dabei analog Gleichung 5.10 zu beschreiben.

$$\underline{f}_k(\underline{x}_k) = \begin{pmatrix} x_{2,k} \\ -x_{1,k}x_{3,k}^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad k = 1, \dots, N_{M,DFT}$$

$$h_k(\underline{x}_k) = x_{1,k}, \quad k = 1, \dots, N_{M,DFT} \quad 5.103 \quad 5.104$$

[0105] Zudem berechnen sich die Anfangsbedingungen der Filtergleichung 5.102 mit den mittels der diskreten Fourier-Transformation bestimmten Parametern der Moden zu:

$$\hat{\underline{x}}_0 = \begin{bmatrix} \hat{\underline{x}}_{0,1} \\ \hat{\underline{x}}_{0,2} \\ \dots \\ \hat{\underline{x}}_{0,N_{M,DFT}} \end{bmatrix} \quad 5.105$$

[0106] Mit:

$$\underline{x}_{0,k} = \begin{bmatrix} A_{M,DFT,k} \sin(\phi_{M,DFT,k}) \\ \omega_{M,DFT,k} A_{M,DFT,k} \cos(\phi_{M,DFT,k}) \\ \omega_{M,DFT,k} \end{bmatrix}, \quad k = 1, \dots, N_{M,DFT} \quad 5.106$$

[0107] Für die Berechnung der zeitvarianten Korrekturmatrix $\underline{L}(t)$ sind die ebenfalls zeitvarianten Jacobi-Matrizen $\underline{H}(t)$ und $\underline{F}(t)$ aus dem Zustand des Beobachters $\hat{x}$ kontinuierlich nach

$$\underline{H}(t) = \begin{bmatrix} \underline{H}_1 & \underline{H}_2 & \dots & \underline{H}_{N_{M,DFT}} & 1 \end{bmatrix}, \quad \underline{F}(t) = \begin{bmatrix} \underline{F}_1 & \underline{0} & \dots & \dots & 0 \\ \underline{0} & \underline{F}_2 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \underline{F}_{N_{M,DFT}} & 0 \\ \underline{0} & \dots & \dots & \underline{0} & 0 \end{bmatrix} \quad 5.107$$

zu bestimmen. Die Blockmatrizen $\underline{H}_k$ des Systemausgangs und die diagonal angeordneten Blockmatrizen $\underline{F}_k$ sind wie nachfolgend beschrieben aufgebaut.

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{H}}_k(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & k = 1, \dots, N_{M,DFT} \\ \underline{\mathbf{E}}_k(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\hat{x}_{3,k}^2 & 0 & -2\hat{x}_{1,k}\hat{x}_{3,k} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, & k = 1, \dots, N_{M,DFT} \end{aligned}$$

5.108 5.109

[0108] Zuletzt sind noch die Entwurfsparameter des Erweiterten Kalman-Filters vorzugeben. Diese bestehen aus den Kovarianzmatrizen $\mathbf{Q}$ und $\mathbf{R}$, welche symmetrisch und positiv definit zu wählen sind. Zudem gilt es eine geeignete Anfangsbedingung für $\mathbf{P}_0$ festzulegen. $\mathbf{Q}$ wird folglich wiederum als eine Diagonalmatrix angesetzt, dessen Einträge je nach Frequenz der zugehörigen Mode gewichtet werden. Die Struktur der Kovarianzmatrix $\mathbf{Q}$, wie sie in Gleichung 5.110 angegeben ist, gleicht damit der im linearen Fall eingesetzten Matrix $\mathbf{Q}$.

$$\underline{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Q}}_1 & \underline{\mathbf{0}} & \dots & \dots & \underline{\mathbf{0}} \\ \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{Q}}_2 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \underline{\mathbf{Q}}_{N_{M,DFT}} & \underline{\mathbf{0}} \\ \underline{\mathbf{0}} & \dots & \dots & \underline{\mathbf{0}} & c_{off} \end{bmatrix}$$

5.110

[0109] Die einzelnen Blockmatrizen $\mathbf{Q}_k$ unterscheiden sich jedoch durch ihre Anzahl von Elementen, da das nichtlineare Modell der Tauchbewegung drei Zustände pro Mode besitzt. Als Diagonalmatrix angesetzt ergeben sich diese zu:

$$\underline{\mathbf{Q}}_k = \begin{bmatrix} c_k & 0 & 0 \\ 0 & c_k & 0 \\ 0 & 0 & c_{\omega,k} \end{bmatrix}, \quad k = 1, \dots, N_{M,DFT}$$

5.111

[0110] Zuletzt gilt es noch eine geeignete Anfangsbedingung für die Matrix-Riccati-Differentialgleichung $\mathbf{P}_0$ vorzugeben. Diese bildet sich gemäß Gleichung 5.101 aus der erwarteten Abweichung zwischen dem Zustand des Beobachters und dem realen System. Unter Verwendung der Fehlerabschätzungen der Modellidentifikation ist diese wie folgt

$$\underline{\mathbf{P}}_0 = \mathbf{E} \left\{ \begin{bmatrix} (\tilde{x}_{0,1}) \\ (\tilde{x}_{0,2}) \\ \vdots \\ (\tilde{x}_{0,N_{M,DFT}}) \\ 0,5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\tilde{x}_{0,1}) & (\tilde{x}_{0,2}) & \dots & (\tilde{x}_{0,N_{M,DFT}}) & 0,5 \end{bmatrix}^T \right\}$$

5.113

mit den Abschätzungen der einzelnen Zustandsfehler $\tilde{x}_{0,k}$ der Moden

$$\tilde{x}_{0,k} = \hat{x}_{0,k} - x_{0,k} = \begin{bmatrix} 0,7A_{M,DFT,k} \\ 2\pi 0,002 \cdot 0,7A_{M,DFT,k} \\ 2\pi 0,002 \end{bmatrix}, \quad k = 1, \dots, N_{M,DFT}$$

5.114

[0111] Die Berechnung der Parameter der Moden erfolgt invers zur Berechnung des Anfangszustands $\hat{x}_0$ des linearen, als auch des nichtlinearen Zustandsmodells. Dabei wird als Berechnungsgrundlage der geschätzte Zustand des Modells

$\hat{x}(T)$ zum Zeitpunkt T, also der Gegenwart, verwendet. Dieser wird über das gesamte Zeitintervall der Beobachtung von $t_{0,Obs} \leq t \leq T$ an Hand der neuesten Messdaten der Tauchbewegung adaptiert. Somit werden alle bis zu diesem Zeitpunkt auftretenden Veränderungen in der Dynamik der Tauchbewegung berücksichtigt.

[0112] Im linearen Fall sind die zwei Zustände des k-ten Modes nach Gleichung 5.61 wie folgt definiert:

$$\begin{aligned}\hat{\underline{x}}_{1,k}(t) &= A_{M,Obs,k} \sin(\omega_{M,DFT,k}t + \phi_{M,Obs,k}), & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \\ \hat{\underline{x}}_{2,k}(t) &= \omega_{M,DFT,k} A_{M,Obs,k} \cos(\omega_{M,DFT,k}t + \phi_{M,Obs,k}), & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \\ \hat{\underline{x}}_{2N_{M,DFT}+1}(t) &= z_{LA,Obs}(t)\end{aligned}$$

5.115

5.116 5.117

[0113] Werden die beiden Gleichungen zum Zeitpunkt T nach $\phi_{M,Obs,k}$ und $A_{M,Obs,k}$ aufgelöst, so resultiert:

$$\begin{aligned}\phi_{M,Obs,k} &= \arctan\left(\omega_{M,DFT,k} \frac{\hat{\underline{x}}_{1,k}(T)}{\hat{\underline{x}}_{2,k}(T)}\right) - \omega_{M,DFT,k}T, & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \\ A_{M,Obs,k} &= \frac{\hat{\underline{x}}_{1,k}(T)}{\sin(\omega_{M,DFT,k}T + \phi_{M,Obs,k})}, & k &= 1, \dots, N_{M,DFT}\end{aligned}$$

5.118

5.119

[0114] Dabei gilt zu beachten, dass der Arcustangens nur in einem Intervall zwischen $\pm \pi$ eindeutig definiert ist, womit eine Fallunterscheidung zur Bestimmung der Phasen notwendig wird. Soll zudem die mögliche Division durch Null bei der Implementierung abgefangen werden, so ist die Phase wie folgt zu berechnen:

$$\Phi_k = \arctan\left(\omega_{M,DFT,k} \frac{|\hat{\underline{x}}_{1,k}(T)|}{|\hat{\underline{x}}_{2,k}(T)|}\right) - \omega_{M,DFT,k}T, \quad k = 1, \dots, N_{M,DFT}$$

5.120

[0115] Mit:

$$\begin{aligned}\text{Fall 1:} & \quad \hat{\underline{x}}_{2,k}(T) > 0, & \Rightarrow & \quad \phi_{M,Obs,k} = \Phi_k \\ \text{Fall 2:} & \quad \hat{\underline{x}}_{1,k}(T) > 0 \wedge \hat{\underline{x}}_{2,k}(T) = 0, & \Rightarrow & \quad \phi_{M,Obs,k} = \pi/2 \\ \text{Fall 3:} & \quad \hat{\underline{x}}_{1,k}(T) \geq 0 \wedge \hat{\underline{x}}_{2,k}(T) < 0, & \Rightarrow & \quad \phi_{M,Obs,k} = \pi - \Phi_k \\ \text{Fall 4:} & \quad \hat{\underline{x}}_{1,k}(T) < 0 \wedge \hat{\underline{x}}_{2,k}(T) < 0, & \Rightarrow & \quad \phi_{M,Obs,k} = \pi + \Phi_k \\ \text{Fall 5:} & \quad \hat{\underline{x}}_{1,k}(T) < 0 \wedge \hat{\underline{x}}_{2,k}(T) = 0, & \Rightarrow & \quad \phi_{M,Obs,k} = 3\pi/2\end{aligned}$$

5.121-5.125

[0116] Dabei bezieht sich die Phase der Moden $\phi_{M,Obs,k}$, konsistent der Modellbildung der Tauchbewegung, auf den Zeitpunkt t_0 . Als letzter Parameter, der mit dem linearen Kalman-Bucy-Filter parametrisiert werden kann, ist der stationäre Offset der Tauchbewegung zu bestimmen. Dieser wird durch den $2N_{M,DFT} + 1$ -sten Zustand des Beobachtermodells beschrieben und ermittelt sich folglich gemäß nachstehender Gleichung.

$$z_{LA,off,Obs} = \hat{\underline{x}}_{2N_{M,DFT}+1}(T)$$

5.126

[0117] Wie bereits erwähnt ist es mit dem linearen Beobachterentwurf nur möglich eine beobachtergestützte Adaption der Amplituden $A_{M,Obs}$, der Phasen $\omega_{M,Obs}$ und des statischen Offsets $z_{LA,Obs}$ zu erreichen. Die Kreisfrequenzen sind somit für die nachfolgende Prognose der Tauchbewegung weiterhin vom Identifikationsverfahren mittels der diskreten Fourier-Transformation zu übernehmen. Für eine vollständige, beobachtergestützte Parametrierung des Modells der

Tauchbewegung ist der nichtlineare Ansatz zu verwenden. Unter Verwendung des vorgestellten, nichtlinearen Beobachters werden die Parameter der Moden analog dem linearen Fall berechnet.

[0118] Nach Gleichung 5.102 sind die Zustände des erweiterten Kalman-Filters wie unten dargestellt definiert.

$$\begin{aligned}
 \hat{\underline{x}}_{1,k}(t) &= A_{M,Obs,k} \sin(\omega_{M,Obs,k}t + \phi_{M,Obs,k}), & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \\
 \hat{\underline{x}}_{2,k}(t) &= \omega_{M,Obs,k} A_{M,Obs,k} \cos(\omega_{M,Obs,k}t + \phi_{M,Obs,k}), & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \\
 \hat{\underline{x}}_{3,k}(t) &= \omega_{M,Obs,k}, & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \\
 \hat{\underline{x}}_{3N_{M,DFT}+1}(t) &= z_{LA,Obs}(t)
 \end{aligned}$$

5.127-

5.130

[0119] Die für die Prognose der Tauchbewegung zu verwendenden Parameter $A_{M,Obs,k}$, $\omega_{M,Obs,k}$, $\phi_{M,Obs,k}$ und $z_{LA,Obs}$ sind somit in nachfolgend angegebener Reihenfolge zu berechnen.

$$\begin{aligned}
 \omega_{M,Obs,k} &= \hat{\underline{x}}_{3,k}(T), & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \\
 \phi_{M,Obs,k} &= \arctan\left(\omega_{M,Obs,k} \frac{\hat{\underline{x}}_{1,k}(T)}{\hat{\underline{x}}_{2,k}(T)}\right) - \omega_{M,Obs,k}T, & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \\
 A_{M,Obs,k} &= \frac{\hat{\underline{x}}_{1,k}(T)}{\sin(\omega_{M,Obs,k}T + \phi_{M,Obs,k})}, & k &= 1, \dots, N_{M,DFT} \\
 z_{LA,Obs} &= \hat{\underline{x}}_{3N_{M,DFT}+1}(T)
 \end{aligned}$$

5.131 —

5.134

[0120] Dabei ist bei der Invertierung des Tangens wiederum die in den Gleichungen 5.121ff. angegebene Fallunterscheidung zu berücksichtigen.

[0121] Ein Ausführungsbeispiel eines Steuersystems, in welchem die oben dargestellten Mess- und Prognoseverfahren zur Ansteuerung des Hubwerkes eines Kranes eingesetzt werden, wird nun im folgenden kurz dargestellt: Offshore-Anlagen führen während rauer Meeresbedingungen zu strengen Anforderungen bezüglich Sicherheit und Wirkungsgrad des betroffenen Kransystems. Daher wird ein Seegangsfolgesystem, das auf einer Prognose der Seegangsbewegung und einer inversionsbasierten Steuerstrategie beruht, vorgeschlagen. Das Steuerziel besteht darin, die an einem Seil hängende Nutzlast in einem erdfesten Koordinatensystem einer erwünschten Referenzbahn folgen zu lassen, ohne dass sie durch die Seegangsbewegung des Schiffs oder Wasserfahrzeugs beeinflusst wird. Daher wird eine Kombination aus einem Steuergerät, das die Störung der Bahnverfolgung abkoppelt, und einem Prognosealgorithmus vorgestellt und mit Simulations- und Messergebnissen ausgewertet.

[0122] Heutzutage gewinnen Offshore-Anlagen, wie Unterwasserfördersysteme für Öl und Gas oder Windparks, zunehmend an Bedeutung. Die Verarbeitungseinrichtungen für die Ausbeute von Öl- und Gasfeldern sind bereits auf dem Meeresboden installiert. Daher ist die Zugriffsmöglichkeit für Wartung, Reparatur und Ersatz verglichen mit schwimmenden oder festen Förderplattformen geringer. Das Betreiben solcher Anlagen führt bei dem betroffenen Kransystem (siehe Fig. 1) zu strengen Anforderungen bezüglich Sicherheit und Wirkungsgrad. Das Hauptziel besteht darin, den Betrieb während rauen Meeresbedingungen sicherzustellen, um Ausfallzeiten zu minimieren. Ferner ist die Sicherheit der Arbeiter an Bord wesentlich. Es kann zu Situationen kommen, bei denen die Steuerung der Nutzlast verloren geht.

[0123] Neben dem Navigations-/Positionierproblem führen die durch Wellen ausgelösten Bewegungen des Schiffs/Wasserfahrzeugs zu kritischer Zugspannung des Seils. Die Zugspannung sollte nicht unter null liegen, um Situationen mit schlaffem Seil zu vermeiden. Der Spitzenwert darf einen Sicherheitsgrenzwert nicht überschreiten. Daher werden Seegangsfolgesysteme genutzt, um die Betriebsbereitschaft von Offshore-Anlagen während rauer Meeresbedingungen zu verbessern. Zudem kann die vertikale Bewegung der Nutzlast signifikant verringert werden, was eine exakte Positionierung der Last möglich macht.

[0124] Die vorliegende Erfindung gibt ein Seegangsfolgesystem an die Hand, das auf der Prognose der Bewegung des Schiffs/Wasserfahrzeugs sowie auf einer inversionsbasierten Steuerstrategie beruht. Grundsätzlich gibt es zwei Anforderungen an die Folgesysteme für Offshore-Kräne. Die erste besteht darin, die Last einer erwünschten Referenzbahn folgen zu lassen, die aus den Handhebelsignalen des Bedieners in einem erdfesten Bezugskordinatensystem erzeugt wird. Die Last sollte sich in diesem Koordinatensystem bei der zugewiesenen Referenzgeschwindigkeit abge-

koppelt von der durch Wellen ausgelösten Bewegung des Schiffs bewegen. Die zweite Anforderung ist ein modularer Kran mit Seegangsfolge. D.h. die für Offshore-Anlagen verwendeten Kransysteme können auf vielen verschiedenen Arten von Schiffen oder Wasserfahrzeugen aufgebaut werden. Zudem muss der Schätz- und Prognosealgorithmus für die vertikale Bewegung des Schiffs/Wasserfahrzeugs von der Art des Schiffs/Wasserfahrzeugs unabhängig sein.

[0125] Hierfür wird das dynamische Modell des Systems, das aus dem hydraulischen Aktor (Winde) und dem nachgiebigen Seil besteht, abgeleitet. Beruhend auf diesem Modell wird ein linearisierendes Steuergesetz formuliert. Zum Stabilisieren des Steuersystems wird ein Regler abgeleitet. Fig. 8 zeigt den allgemeinen Steueraufbau.

[0126] Weiterhin wird die Schätzung und Prognose der Bewegung des Schiffs/Wasserfahrzeugs vorgestellt. Daher wird ein Modell formuliert, das auf den vorherrschenden Moden der Seegangsbewegung beruht. Die Moden werden durch eine Fast-Fourier-Transformation und einen Spitzendetektionsalgorithmus erhalten. Die Schätzung und Prognose erfolgt durch einen Kalmanfilter. Es werden Simulations- und Messergebnisse dargestellt.

Das dynamische Modell

[0127] Das vorliegend betrachtete Seegangsfolgesystem besteht im Grunde aus einer hydraulikbetriebenen Winde, einer kranartigen Struktur und der an einem Seil hängenden Last. Zum Modellieren des Systems wird angenommen, dass die Kranstruktur ein steifer Körper ist. Die von einem Seil hängende Nutzlast kann durch ein Feder-Masse-Dämpfer-System approximiert werden (siehe Fig. 9).

[0128] Zum Approximieren des nachgiebigen Seils muss die äquivalente Masse m_{eq} und die Steifheit der Feder c_{rope} berechnet werden. Mit Hilfe des Hook'schen Gesetzes kann die Verformung $\varepsilon(z)$ für ein Seil bei einer willkürlichen Position z erhalten werden aus:

$$\varepsilon(z) = \frac{\sigma(z)}{E} = \frac{F(z)}{EA_{rope}} = \frac{g}{EA_{rope}} ((depth - z) m_{l,rope} + m_{load}). \quad (1)$$

$\sigma(z)$ ist die Zugspannung des Seils, E ist das Young'sche Modul, $F(z)$ die auf das Seil an der Position z wirkende statische Kraft, A_{rope} die Schnittfläche des Seils, g die Gravitationskonstante, $depth$ der Abstand der Last zum Meeresspiegel, $m_{l,rope}$ und m_{load} die Masse des Seils pro Meter bzw. die Masse der Nutzlast.

[0129] Die Ausdehnung des gesamten Seils Δl_R wird mit Hilfe von Gleichung (2) erhalten.

$$\begin{aligned} \Delta l_R &= \int_0^{depth} \varepsilon(z) dz \\ &= g \underbrace{\left(\frac{depth}{2} m_{l,rope} + m_{load} \right)}_{\text{rope suspended load}} \underbrace{\frac{depth}{EA_{rope}}}_{\text{approximation}} = \frac{gm_{eq}}{c_{rope}} \end{aligned} \quad (2)$$

[0130] Eine Auswertung (2) ergibt

$$m_{eq} = \left(\frac{depth}{2} m_{l,rope} + m_{load} \right) \text{ and } c_{rope} = \frac{depth}{EA_{rope}}. \quad (3)$$

[0131] Mit Hilfe des Verfahrens von Newton/Euler wird die Differenzialgleichung zweiter Ordnung für die Bewegung der an einem Seil hängenden Nutzlast erhalten (siehe (4)). Die Lastschwingungen werden durch Windenbeschleunigungen $\ddot{\varphi}_W$ und die zweite Ableitung der Seegangsbewegung $\ddot{w}$ beendet.

$$m_{eq} \ddot{l}_R + d_{rope} \dot{l}_R + \frac{EA_{rope}}{depth} (l_R - depth) = m_{eq} (r_W \ddot{\varphi}_W + \ddot{w}) \quad (4)$$

[0132] Der Aktor für das Seegangsfolgesystem ist die hydraulikbetriebene Winde. Die Dynamik dieses Aktors kann mit einem System erster Ordnung approximiert werden.

$$\ddot{\phi}_W = -\frac{1}{T_W} \dot{\phi}_W + \frac{2\pi K_{V,W}}{i_W V_{mot,W} T_W} u_W \quad (5)$$

$\ddot{\phi}_W$ und $\dot{\phi}_W$ sind die Winkelbeschleunigung bzw. Geschwindigkeit der Winde, T_W die Zeitkonstante, $V_{mot,W}$ das Volumen des Hydraulikmotors, u_W die Eingangsspannung des Servoventils und $K_{V,W}$ die proportionale Konstante der Strömrate zu u_W .

Die Steuerstrategie

[0133] Um ein Steuergesetz abzuleiten, wird das dynamische Modell des Systems in folgender Form abgeleitet. Die Störgröße d wird als die 4. Ableitung der Seegangsbewegung definiert. Somit ist der relative Grad des Systems gleich dem relativen Grad der Störgröße und eine Abkopplung der Störgröße durch Isidori ist möglich.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u_W + p(x)d \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (6)$$

[0134] Mit den Zuständen $\underline{x} = \begin{bmatrix} l_R & \dot{l}_R & \phi_W & \dot{\phi}_W & \ddot{w} & \dddot{w} \end{bmatrix}^T$, Gleichung (4) und (5) sowie der Modellausweitung werden die dynamischen Gleichungen wie folgt erhalten

$$\dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{EA_{rope}}{m_{eq} depth} (x_1 - depth) - \frac{d_{rope}}{m_{eq}} x_2 - \frac{r_W}{T_W} x_4 + x_3 \\ x_4 \\ -\frac{1}{T_W} x_4 \\ x_6 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2\pi r_W K_{V,W}}{i_W V_{mot,W} T_W} \\ 0 \\ \frac{2\pi K_{V,W}}{i_W V_{mot,W} T_W} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_W + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{w} \quad (7)$$

$$y = x_1 - r_W x_3 = l_R - r_W \phi_W$$

[0135] Zum Prüfen der Flachheitseigenschaft des vorgeschlagenen Modells des Systems muss der relative Grad ermittelt werden.

Relativer Grad

[0136] Der relative Grad bezüglich der Ausgabe des Systems wird durch die folgenden Bedingungen definiert

$$\begin{aligned} L_g L_f^i h(x) &= 0 & \forall i = 0, \dots, r-2 \\ L_g L_f^{r-1} h(x) &\neq 0 & \forall x \in R^n \end{aligned} \quad (8)$$

[0137] Der Operator L_f stellt die Lie-Ableitung entlang des Vektorfelds f bzw. L_g entlang des Vektorfelds g dar. Mit der Ausgabe y wird ein relativer Grad $r = 4$ erhalten. Der relative Grad der Störgröße wird durch Verwenden von (8) mit dem Vektorfeld p anstelle von g mit $r_d = 4$ erhalten. Da die Ordnung des Systems $n = 6$ beträgt, liegt eine interne Dynamik zweiter Ordnung vor und y ist keine flache Ausgabe. Es kann gezeigt werden, dass diese interne Dynamik das Störgrößenmodell ist. In unserem Fall besteht die interne Dynamik aus einer doppelten Integratorkette. Das bedeutet, dass die interne Dynamik instabil ist. Somit ist das Lösen der internen Dynamik durch Online-Simulation unmöglich. Doch für den hier gegebenen Anwendungsfall können nicht nur die Störgröße $d = \ddot{w}$, sondern auch die Zustände $x_5 = \ddot{w}$ und $x_6 = \ddot{w}$ durch das später erläuterte Verfahren geschätzt und prognostiziert werden. Dies macht die Simulation der internen Dynamik unnötig und es kann ein bahnverfolgendes und die Störgröße abkoppelndes Steuergerät abgeleitet werden.

Das Bahnfolge-Steuergerät

[0138] Das die Störgröße abkoppelnde Bahnfolge-Steuergerät kann beruhend auf dem Verfahren der Linearisierung von Eingabe/Ausgabe formuliert werden.

5

10

15

$$u_{w,lin} = \frac{1}{L_g L_f^{-1} h(\underline{x})} \left(-L_f h(\underline{x}) - L_p L_f^{-1} h(\underline{x}) \ddot{w} + y_{ref}^{(r)} \right) \\ = \frac{m_{eq} i_w V_{mot,w} T_w depth}{2\pi E A_{rope} r_w K_{v,w}} \cdot \left(\left(-\frac{E A_{rope}}{m_{eq} depth} \right)^2 (l_R - depth) + \dots \right. \\ \left. \dots \frac{r_w}{m_{eq} T_w depth} \dot{\phi}_w - \frac{E A_{rope}}{m_{eq} depth} \ddot{w} - \ddot{w} + \ddot{y}_{ref} \right) \quad (9)$$

[0139] Zum Stabilisieren des sich ergebenden gesteuerten Systems wird ein Regelungsterm hinzugefügt. Der Term (Gleichung (10)) gleicht den Fehler zwischen den Bezugsbahnen y_{ref} und den Ableitungen der Ausgabe y aus.

20

$$u_{w,FB} = \frac{\sum_{i=0}^{r-1} k_i \left[L_f^i h(\underline{x}) - y_{ref}^{(i)} \right]}{L_g L_f^{-1} h(\underline{x})} \quad (10)$$

25

[0140] Die Verstärkungen der Rückführungswerte k_i werden durch das Polzuweisungsverfahren erhalten. Der Steuerungsaufbau wird in Fig. 8 veranschaulicht.

Die Schätzung und Prognose der Seegangsbewegung

30

[0141] Der erste Teil dieses Abschnitts macht einen Vorschlag, wie die gesamte Bewegung des Schiffs/Wasserfahrzeugs durch Messen mit einer Inertialplattform (Initial Measurement Unit (IMU)) geschätzt werden kann. Als ausschlaggebende Forderung sollten für diese Schätzung alle schiffsspezifischen Informationen verwendet werden. Der zweite Teil erläutert ein Kurzzeit-Prognoseproblem. Hier wird nur die Seegangsbewegung der Krane prognostiziert. Dies verringert die Komplexität von 6 Freiheitsgraden auf nur einen, ohne erforderliche Informationen zu verlieren. Wie vorstehend gewünscht ist die Prognose ebenfalls vollständig unabhängig von einem Schiffsmodell.

35

Messung von Schiffsbewegung

40

[0142] Das als starrer Körper geltende Schiff/Wasserfahrzeug weist 6 Freiheitsgrade auf. Mit einer IMU kann die Verlagerung des Schiffs aus dem stabilen Zustand mit hoher Präzision gemessen werden. Diese kostengünstigen eigenständigen Bewegungssensoren weisen 3 Beschleunigungsmesser zum Messen von Brandung, Schaukeln und Seegang sowie 3 Drehratensensoren für Rollen, Stampfen und Gieren auf. Zum Erhalten der erwünschten relativen Position des Schiffs sind eine doppelte Integration der Beschleunigungssignale und eine einfache Integration der Drehsignale erforderlich. Zum Reduzieren typischer Fehler wie Sensorrauschen, Bias und Fehlausrichtung der Beschleunigungsmesser und zum Sicherstellen einer stabilen Integration können die Signale aufbereitet werden.

45

[0143] Wenn die IMU nicht an dem Aufhängungspunkt der Nutzlast befestigt wird, führt eine einfache Transformation zwischen dem Koordinatensystem des Sensors und dem Koordinatensystem des Aufhängungspunkts der Nutzlast zu der erwünschten Seegangsbewegung.

Prognose des Bewegens des Aufhängungspunkts der Nutzlast

50

[0144] Die Tatsache, dass die Bewegung des Aufhängungspunkts der Nutzlast nicht restlos chaotisch ist, sondern von der Dynamik des Schiffs und der Meeresbedingung abhängt, ermöglicht das Berechnen einer Prognose seiner Bewegung. Es ist sogar eine Kurzzeit-Prognose ohne jegliche Kenntnisse der Eigenschaften des Schiffs möglich.

55

[0145] Die Hauptidee dieses Prognoseverfahrens ist das Detektieren der periodischen Komponenten der gemessenen Seegangsbewegung und das Verwenden derselben zum Berechnen der künftigen Seegangsentwicklung. Daher wird die gemessene Seegangsbewegung $w(t)$ zwischen zwei Zeitpunkten t_0 und T in einen Satz von N Sinuswellen, die so genannten Moden, und einen zusätzlichen willkürlichen Term $u(t)$ zerlegt. Dies ergibt ein Seegangsbewegungsmodell, das beschrieben wird durch:

$$w(t) = \left(\sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \right) + v(t) \quad i = 1, \dots, N \quad t_0 \leq t \leq T \quad (11)$$

wobei A_i die Amplitude ist, f_i die Frequenz und φ_i die Phase der i -ten Mode ist. Das Ziel der Prognose ist das Schätzen, wie viele Moden für eine präzise Vorhersage der Länge T_{Pred} erforderlich sind, und das Anpassen der drei Parameter für jede Mode.

[0146] Der Aufbau des Prognoseverfahrens wird in Fig. 10 dargestellt. Zunächst wird eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) an der gemessenen Seegangsbewegung $w(t)$ angelegt. Die analysierte Länge und Abtastzeit des Eingangssignals werden so gewählt, dass die maximale Frequenz der Seegangsbewegung detektiert werden kann und die erwünschte Auflösung der Frequenzen erreicht wird. Die Spitzen der sich ergebenden Amplitudenreaktion über Frequenz $A(f)$ werden dann durch einen Spitzendetektor extrahiert. Dies führt zu einer ersten Schätzung der Amplituden und Frequenzen der Mode, die in den jeweiligen Parametervektoren $\underline{A}_{\text{FFT}}$ und $\underline{f}_{\text{FFT}}$ gespeichert werden. Die Modengröße N ist gleich der Anzahl detektierter Spitzen. Durch Berücksichtigen der Phasenreaktion $\varphi(f)$ können die Phasen $\underline{\varphi}_{\text{FFT}}$ der Mode ebenfalls definiert werden. Mit diesen Parametern, die online aktualisiert werden, kann das in (11) beschriebene Modell der Seegangsbewegung parametrisiert werden. Die Auswertung der real gemessenen Seegangsbewegungsdaten zeigt die Notwendigkeit eines ständig aktualisierten Modells (siehe Fig. 11).

[0147] Hier werden die detektierten Spitzen der Bewegung eines Schiffs unter rauen Meeresbedingungen dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass sich die Moden während der Messung ändern.

[0148] Im nächsten Schritt passt ein Beobachter die Parametervektoren durch Vergleichen der gemessenen Seegangsbewegung $w(t)$ mit der modellierten Seegangsbewegung an. Dies ist erforderlich, da die FFT nur Mittelwerte eines langen Zeitraums detektiert, während der Beobachter die letzten Veränderungen berücksichtigen kann. Mit diesen neuen Parametervektoren, die durch $\underline{A}_{\text{Obs}}$, $\underline{f}_{\text{Obs}}$ und $\underline{\varphi}_{\text{Obs}}$ bezeichnet sind, kann die Prognose der Seegangsbewegung unter erneutem Verwenden von (11) durchgeführt werden.

Beobachter

[0149] Die Ausgestaltung des Beobachters hängt von einem Seegangsbewegungsmodell ab, das durch einen Satz gewöhnlicher Differenzialgleichungen (ODEs, kurz vom engl. Ordinary Differential Equations) beschrieben wird. Zum Umwandeln des Modells (11) in einen Satz ODEs gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen kann die Seegangsbewegung als nichtlineares System modelliert werden, das dem Beobachter das Schätzen aller für die Prognose des Seegangs erforderlichen Parameter ermöglicht. Aufgrund der Forderung, eine Online-Prognose zu erhalten, ist dieses Verfahren aber nicht auf moderneren Computern verwendbar. Dagegen kann stattdessen ein lineares Modell verwendet werden. Hier werden lediglich die Frequenzen der Mode nicht erneut angepasst. Diese werden aber durch die FFT sowieso mit großer Präzision geschätzt. Bei Wählen des linearen Verfahrens kann ein Kalmanfilter verwendet werden. Dies ergibt eine nachstehend gezeigte Beobachter-Gleichung.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + L(w - \hat{w}) & \hat{x}(t_0) &= x_0 \\ \hat{w} &= C\hat{x} & t_0 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (12)$$

[0150] Die Systemmatrizen A und C ergeben sich aus dem nachfolgend beschriebenen Seegangsbewegungsmodell, wogegen die Prognoseergebnisse auch vom ordnungsgemäßen Definieren der Korrekturmatrix abhängen.

[0151] Zum Umwandeln des in (11) beschriebenen Seegangsmodells, das für einen Beobachter geeignet ist, kann durch die ODE eine einzelne Mode definiert werden

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_i x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -(2\pi f_i)^2 & 0 \end{pmatrix} x & x(t_0) &= x_{0,i} = \begin{pmatrix} A_i \sin(\varphi_i) \\ 2\pi A_i f_i \cos(\varphi_i) \end{pmatrix} \\ w_i &= C_i x = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} x & i &= 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (13)$$

[0152] Das Anlegen der durch die FTT erhaltenen Parametervektoren, das Summieren aller Moden und das Einführen eines Offset-Zustands, der den nicht periodischen Term $u(t)$ darstellt, führt zu dem Beobachter-Seegangsmodell

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}} &= \underline{A}\underline{x} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & A_N & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \underline{x} & \underline{x}(t_0) = \underline{x}_0 = \begin{bmatrix} x_{0,1} \\ x_{0,2} \\ \vdots \\ x_{0,N} \\ 0 \end{bmatrix} \\ w(t) &= \underline{C}\underline{x} = [\underline{C}_1 \quad \underline{C}_2 \quad \dots \quad \underline{C}_N \quad 1] \underline{x}. \end{aligned} \quad (14)$$

[0153] Die Wahl der L Matrixelemente kann mit Hilfe der Filter-Auslegung von Kalman und Bucy erreicht werden. Dies erfordert das Lösen der Riccati-Gleichung (Lösung ist P) und das Berechnen der Verstärkungsmatrix L , wie in (15) beschrieben wird.

$$\begin{aligned} PC^T R^{-1} CP - AP - PA^T - Q &= 0 \\ L &= PC^T R^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

[0154] Hier wird das als Auslegungsparameter verwendete Q als diagonale Matrix gewählt, die schnelle Moden stärker abstrahlt als langsame, wogegen R alle Moden gleichmäßig beeinflusst.

[0155] Die durch den Beobachter angepassten Parameter können aus ihren Zuständen extrahiert werden. Beruhend auf den Gleichungen einer einzelnen Mode

$$\begin{aligned} \hat{x}_{1,i}(t) &= A_{Obs,i} \sin(2\pi f_{FFT,i} t + \varphi_{Obs,i}) \\ \hat{x}_{2,i}(t) &= 2\pi A_{Obs,i} f_{FFT,i} \cos(2\pi f_{FFT,i} t + \varphi_{Obs,i}) \end{aligned} \quad (16)$$

können die neuen Parameter berechnet werden durch:

$$\begin{aligned} f_{Obs,i} &= f_{FFT,i} \\ \varphi_{Obs,i} &= \arctan\left(\frac{\hat{x}_{1,i}(T)}{\hat{x}_{2,i}(T)}\right) - 2\pi f_{FFT,i} T \\ A_{Obs,i} &= \frac{\hat{x}_{1,i}(T)}{\sin(2\pi f_{FFT,i} T + \varphi_{Obs,i})} \quad i = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (17)$$

Prognose

[0156] Der letzte Teil des Prognoseverfahrens ist die Berechnung der Prognose selbst. Daher kann (11) unter Heranziehen der Parametervektoren, die durch den Beobachter angepasst wurden, verwendet werden, was ergibt:

$$w_{Pred}(t) = \left(\sum_{i=1}^N A_{Obs,i} \sin(2\pi f_{Obs,i} t + \varphi_{Obs,i}) \right) + v(t) \quad i = 1, \dots, N, \quad T \leq t \leq T_{Pred} \quad (18)$$

[0157] Das Fortschreiten des nicht periodischen Terms $v(t)$ kann nicht prognostiziert werden. Da er gleich dem Offset-Zustand des Beobachters ist, sollte er mit

$$v(t) = const. = \hat{x}_{2N+1}(T) \quad T \leq t \leq T_{Pred}. \quad (19)$$

als Konstante definiert werden.

[0158] Um einen kurzen Eindruck der Leistung der Seegangsprognose zu geben, werden nachstehend Simulationsergebnisse dargestellt. Daher wurden reale IMU-Signale eines Schiffs unter rauen Meeresbedingungen verwendet, um die Seegangsbewegung zu reproduzieren. Fig. 12 zeigt die prognostizierte und gemessene Seegangsbewegung im zeitlichen Verlauf. Das Prognoseintervall T_{Pred} wurde zu 1 Sekunde gewählt. Zur besseren Veranschaulichung wurde die prognostizierte Seegangsbewegung danach zeitlich zurückgesetzt. Somit würde ein fehlerfreies prognostiziertes Signal mit dem gemessenen Signal übereinstimmen.

Simulations- und Messergebnisse

[0159] In Fig. 13 ist das simulierte Folgeverhalten des Seegangsfolgesystems ersichtlich. Die Referenzbahn wird durch ein Handhebelsignal erzeugt und der Kran wird einer Seegangsbewegung ausgesetzt. Für diese Simulation wurde lediglich ein linearisierendes Steuergerät ohne Stabilisierung verwendet. Mit diesem Aufbau kann die Erregung der Aufhängungspunktbewegung der Nutzlast, die in der ersten Kurvendarstellung von Fig. 14 gezeigt wird, um einen Faktor 5 verringert werden. Der Grund, warum diese Schwingungen nicht vollständig unterdrückt werden, ist, dass das System Pumpe/Motor mit einer Totzeit simuliert wurde, die in der Auslegung des Steuergeräts nicht berücksichtigt wird.

[0160] Das Verwenden des Beobachters und das Schließen des Kreislafs des Steuersystems verbessert das Folgeverhalten enorm. Wie in Fig. 14 ersichtlich ist, wird die simulierte Positionsverschiebung nie größer als $\pm 3\text{cm}$.

[0161] Bei den ersten beiden Simulationen war die Seegangsprognose abgeschaltet. Fig. 15 zeigt das Folgeverhalten der Nutzlastposition bei offenem Kreislauf mit einer Seegangsprognose in dem Bereich der Totzeit des Aktors (0,2 Sekunden). Es ist ersichtlich, dass gute Seegangsausgleichsergebnisse erzielt werden, sobald das linearisierende Steuergerät aktiviert wird, was bei der Zeit 250 s erfolgt. Bei Vergleichen des Folgens mit und ohne Seegangsprognose ist eine klare Verbesserung ersichtlich.

[0162] Zum Verbessern der Simulationsergebnisse wurden Messungen mit einem experimentellen Aufbau durchgeführt.

Schlussfolgerung

[0163] Die vorliegende Erfindung stellt ein Vorgehen für den Ausgleich der Seegangsbewegung bei Offshore-Kränen dar. Das dynamische Modell des Ausgleichsaktors (hydraulisch betriebene Winde) und der an einem Seil hängenden Last werden abgeleitet. Basierend auf diesem Modell wird ein Bahnfolgesteuergerät entwickelt. Zum Ausgleichen der durch Wellen ausgelösten Bewegung des Schiffs/Wasserfahrzeugs wird die Seegangsbewegung als zeitvariante Störgröße definiert und wird bezüglich Abkopplungsbedingungen analysiert. Mit einer Modellausweitung werden diese Bedingungen erfüllt und ein inversionsbasiertes abkoppelndes Steuergesetz wird formuliert. Um das System zu stabilisieren, wird ein Beobachter zum Rekonstruieren des unbekannten Zustands aus einer Kraftmessung verwendet. Ferner kann die Ausgleichsleistung durch Prognostizieren der Seegangsbewegung verbessert werden. Es wird ein Prognoseverfahren vorgeschlagen, bei dem keine Schiffs-/Wasserfahrzeugmodelle oder -eigenschaften erforderlich sind. Die Simulations- und Messergebnisse validieren das Seegangsfolgeverfahren.

Patentansprüche

1. Kransteuerung mit aktiver Seegangsfolge für einen auf einem Schwimmkörper angeordneten Kran, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist, mit einer Messvorrichtung, welche eine aktuelle Seegangsbewegung aus Sensordaten ermittelt, einer Prognosevorrichtung, welche die vorherrschenden Moden der Seegangsbewegung aus den Daten der Messvorrichtung bestimmt und anhand der bestimmten vorherrschenden Moden ein Modell des Seegangs erstellt und eine zukünftige vertikale Bewegung des Lastaufhängepunkts anhand der ermittelten aktuellen Seegangsbewegung und des Modells der Seegangsbewegung prognostiziert, und einer Bahnsteuerung der Last, welche durch die Ansteuerung des Hubwerkes des Kranes aufgrund der prognostizierten Bewegung des Lastaufhängepunkts die vertikale Bewegung der Last durch den Seegang zumindest teilweise ausgleicht.
2. Kransteuerung nach Anspruch 1, wobei das in der Prognosevorrichtung verwendete Modell der Seegangsbewegung unabhängig von den Eigenschaften, und insbesondere von der Dynamik des Schwimmkörpers ist.
3. Kransteuerung nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Prognosevorrichtung die vorherrschenden Moden der Seegangsbewegung über eine Frequenzanalyse aus den Daten der Messvorrichtung bestimmt.
4. Kransteuerung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Prognosevorrichtung das Modell anhand der Daten der Messvorrichtung laufend parametrisiert, insbesondere über einen Beobachter, wobei insbesondere Amplitude und Phase der Moden parametrisiert werden.
5. Kransteuerung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei bei einer Änderung der vorherrschenden Moden des Seeganges das Modell aktualisiert wird.

6. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Bahnsteuerung eine Vorsteuerung aufweist, welche auf Grundlage von Sensordaten stabilisiert wird.
7. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Bahnsteuerung auf einem Modell von Kran, Seil und Last beruht, in welchem eine Änderung der Seillänge durch eine Ausdehnung des Seiles berücksichtigt wird.
8. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Bahnsteuerung auf einem Modell von Kran, Seil und Last beruht, welches die Dynamik des Hubwerkes und/oder des Seiles berücksichtigt und insbesondere auf einem physikalischen Modell der Dynamik des Systems aus Hubwerk, Seil und/oder Last beruht.
9. Kransteuerung nach Anspruch 7 oder 8, wobei ein Kraftsensor zum Messen der im Seil und/oder auf das Hubwerk wirkenden Kraft vorgesehen ist, dessen Messdaten in die Bahnsteuerung eingehen und über welche insbesondere die Seillänge bestimmt wird.
10. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Messvorrichtung Gyroskope, Beschleunigungssensoren und/oder GPS-Elemente umfasst, aus deren Messdaten die aktuelle Bewegung des Lastaufhängepunkts ermittelt wird.
11. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Sensoren der Messvorrichtung am Kran angeordnet sind, insbesondere am Kranfundament, und wobei die Messvorrichtung die Bewegung des Lastaufhängepunkts vorteilhafterweise anhand eines Modells des Kranes und der relativen Bewegung von Lastaufhängepunkt und Messpunkt bestimmt.
12. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Messvorrichtung nur die Bewegung des Lastaufhängepunkts in der vertikalen bestimmt.
13. Kran mit einer Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche.
14. Verfahren zur Steuerung eines auf einem Schwimmkörper angeordneten Krans, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist, mit den Schritten:

Ermitteln der aktuellen Seegangsbewegung aus Sensordaten,
Bestimmung der vorherrschenden Moden der Seegangsbewegung aus den Daten der Messvorrichtung und
Ermittlung eines Modells des Seegangs anhand der bestimmten vorherrschenden Moden,
Prognostizieren einer zukünftigen vertikalen Bewegung des Lastaufhängepunkts anhand der ermittelten aktuellen Seegangsbewegung und des Modells der Seegangsbewegung, und
zumindest teilweises Ausgleichen der vertikalen Bewegung der Last durch den Seegang durch die Ansteuerung des Hubwerkes des Kranes aufgrund der prognostizierten Bewegung des Lastaufhängepunkts.
15. Verfahren nach Anspruch 14 mittels einer Kransteuerung nach einem der Ansprüche 1 bis 12.

Claims

1. A crane control with active heave compensation for a crane arranged on a floating body, which includes a hoisting gear for lifting a load hanging on a rope, comprising
a measuring device, which determines a current heave movement from sensor data,
a prediction device, which determines the prevailing modes of the heave movement from the data of the measuring device, and creates a heave model using the prevailing modes determined and predicts a future vertical movement of the load suspension point with reference to the current heave movement determined and the model of the heave movement, and
a path control of the load, which by actuating the hoisting gear of the crane on the basis of the predicted movement of the load suspension point at least partly compensates the movement of the load caused by the sea waves.
2. The crane control according to claim 1, wherein the model of the heave movement used in the prediction device is independent of the properties, and in particular of the dynamics of the floating body.
3. The crane control according to claim 1 or 2, wherein the prediction device determines the prevailing modes of the

heave movement r via a frequency analysis from the data of the measuring device.

4. The crane control according to one of the preceding claims, wherein the prediction device continuously parametrizes the model with reference to the data of the measuring device, in particular via an observer, wherein in particular amplitude and phase of the modes are parametrized.
5. The crane control according to one of the preceding claims, wherein the model is updated in the case of a change in the prevailing modes of the sea waves.
6. The crane control according to any of the preceding claims, wherein the path control includes a pilot control which is stabilized on the basis of sensor data.
7. The crane control according to any of the preceding claims, wherein the path control is based on a model of crane, rope and load, which considers a change in the rope length due to an elongation of the rope.
8. The crane control according to any of the preceding claims, wherein the path control is based on a model of crane, rope and load, which considers the dynamics of the hoisting gear and/or of the rope and in particular is based on a physical model of the dynamics of the system of hoisting gear, rope and/or load.
9. The crane control according to claim 7 or 8, wherein a force sensor is provided for measuring the force acting in the rope and/or on the hoisting gear, whose measurement data are included in the path control and by means of which in particular the rope length is determined.
10. The crane control according to any of the preceding claims, wherein the measuring device comprises gyroscopes, acceleration sensors and/or GPS elements, from whose measurement data the current movement of the load suspension point is determined.
11. The crane control according to any of the preceding claims, wherein the sensors of the measuring device are arranged on the crane, in particular on the crane foundation, and wherein the measuring device advantageously determines the movement of the load suspension point with reference to a model of the crane and the relative movement of load suspension point and measurement point.
12. The crane control according to any of the preceding claims, wherein the measuring device only determines the movement of the load suspension point in the vertical.
13. A crane with a crane control according to any of the preceding claims.
14. A method for controlling a crane arranged on a floating body, which includes a hoisting gear for lifting a load hanging on a rope, with the following steps:
 - determining the current heave movement from sensor data,
 - determining the prevailing modes of the heave movement from the data of the measuring device and determining a model based upon the determined, prevailing modes,
 - predicting a future vertical movement of the load suspension point with reference to the current heave movement determined and a model of the heave movement, and
 - at least partly compensating the movement of the load caused by the sea waves by actuating the hoisting gear of the crane on the basis of the predicted movement of the load suspension point.
15. The method according to claim 14 by means of a crane control according to any of claims 1 to 12.

Revendications

1. Commande de grue dotée d'un suivi actif de houle pour une grue disposée sur un corps flottant, laquelle grue présente un mécanisme de levage destiné à soulever une charge suspendue à un câble, comprenant un dispositif de mesure qui détecte un mouvement de houle actuel à partir de données de capteurs, un dispositif de prévision qui détermine les modes prédominants du mouvement de houle à partir des données du dispositif de mesure et établit un modèle de houle à l'aide des modes prédominants déterminés et prédit un mou-

vement vertical futur du point de suspension de charge à l'aide du mouvement de houle actuel détecté et du modèle du mouvement de houle, et une commande de trajectoire de la charge, laquelle, par la commande du mécanisme de levage de la grue en raison du mouvement prédit du point de suspension de charge, compense au moins en partie le mouvement vertical de la charge par la houle.

2. Commande de grue selon la revendication 1, le modèle du mouvement de houle utilisé dans le dispositif de prévision étant indépendant des caractéristiques, et notamment de la dynamique du corps flottant.
3. Commande de grue selon la revendication 1 ou 2, le dispositif de prévision déterminant les modes prédominants du mouvement de houle à partir des données du dispositif de mesure par l'intermédiaire d'une analyse de fréquence.
4. Commande de grue selon l'une quelconque des revendications précédentes, le dispositif de prévision paramétrant le modèle en permanence à l'aide des données du dispositif de mesure, notamment à l'aide d'un observateur, notamment l'amplitude et la phase des modes étant paramétrées.
5. Commande de grue selon l'une quelconque des revendications précédentes, le modèle étant mis à jour lors d'une modification des modes prédominants de la houle.
6. Commande de grue selon l'une quelconque des revendications précédentes, la commande de trajectoire présentant une commande pilote qui est stabilisée sur la base de données de capteurs.
7. Commande de grue selon l'une quelconque des revendications précédentes, la commande de trajectoire reposant sur un modèle de grue, câble et charge, dans lequel une modification de la longueur de câble est prise en compte en raison d'une extension du câble.
8. Commande de grue selon l'une quelconque des revendications précédentes, la commande de trajectoire reposant sur un modèle de grue, câble et charge, lequel prend en compte la dynamique du mécanisme de levage et/ou du câble, et reposant notamment sur un modèle physique de la dynamique du système constitué du mécanisme de levage, du câble et/ou de la charge.
9. Commande de grue selon la revendication 7 ou 8, un capteur de force destiné à mesurer la force agissant dans le câble et/ou sur le mécanisme de levage étant ménagé, dont les données de mesure entrent dans la commande de trajectoire et par l'intermédiaire desquelles notamment la longueur de câble est déterminée.
10. Commande de grue selon l'une quelconque des revendications précédentes, le dispositif de mesure comprenant des gyroscopes, des capteurs d'accélération et/ou des éléments GPS, à partir des données desquels le mouvement actuel du point de suspension de charge est déterminé.
11. Commande de grue selon l'une quelconque des revendications précédentes, les capteurs du dispositif de mesure étant disposés sur la grue, notamment sur la base de la grue, et le dispositif de mesure déterminant le mouvement du point de suspension de charge avantageusement à l'aide d'un modèle de la grue et du mouvement relatif du point de suspension de charge et du point de mesure.
12. Commande de grue selon l'une quelconque des revendications précédentes, le dispositif de mesure déterminant seulement le mouvement du point de suspension de charge dans la verticale.
13. Grue dotée d'une commande de grue selon l'une quelconque des revendications précédentes.
14. Procédé de commande d'une grue disposée sur un corps flottant, laquelle présente un mécanisme de levage destiné à soulever une charge suspendue à un câble, comprenant les étapes :

détection du mouvement de houle actuel à partir de données de capteurs,
détermination des modes prédominants du mouvement de houle à partir des données du dispositif de mesure et détermination d'un modèle de houle à l'aide des modes prédominants déterminés,
prévision d'un mouvement vertical futur du point de suspension de charge à l'aide du mouvement de houle actuel déterminé et du modèle du mouvement de houle, et
compensation au moins partielle du mouvement vertical de la charge par la houle, par la commande du mécanisme de levage de la grue en raison du mouvement prédit du point de suspension de charge.

- 15.** Procédé selon la revendication 14 au moyen d'une commande de grue selon l'une quelconque des revendications 1 à 12.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

Fig. 1

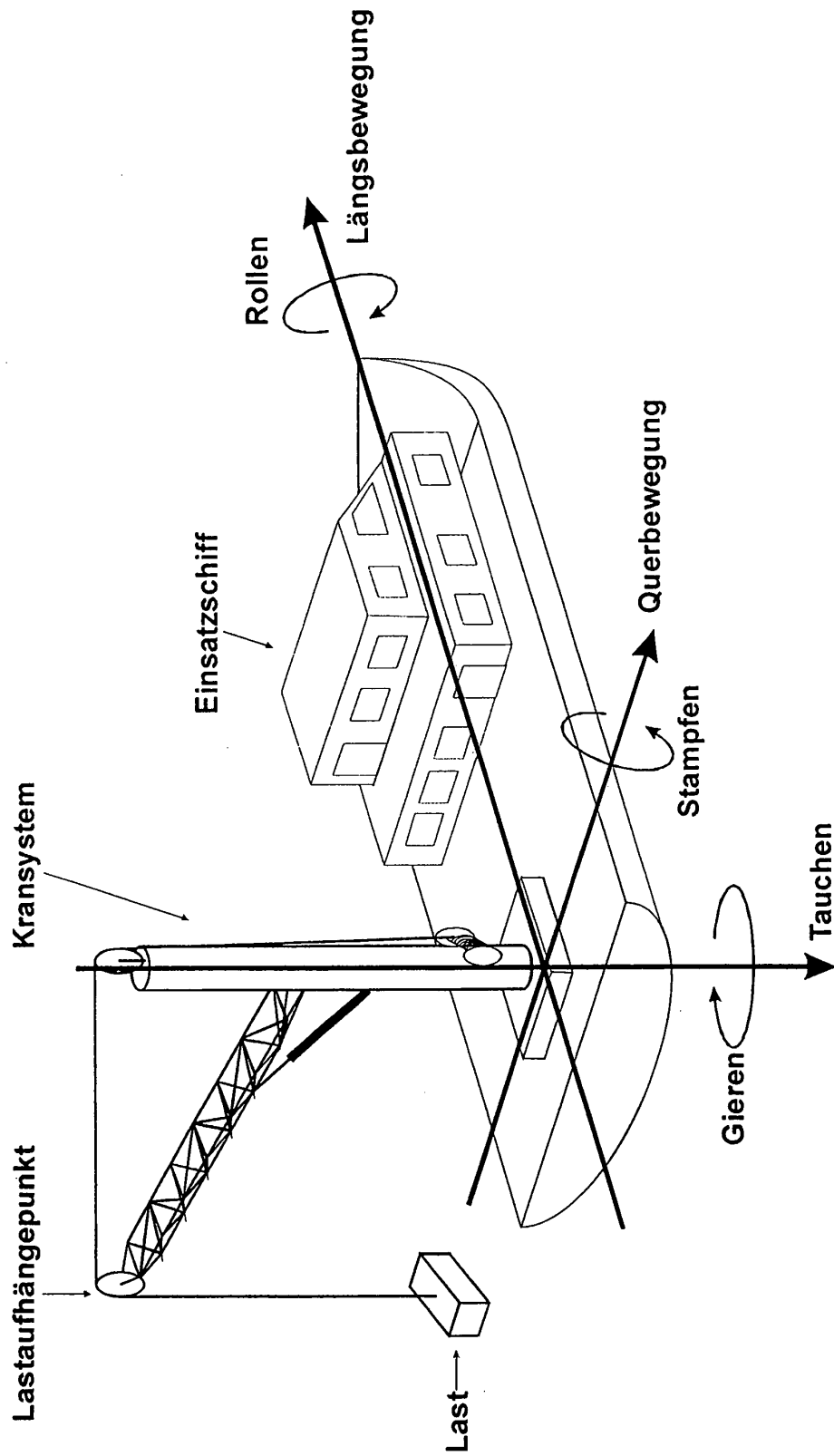


Fig. 2

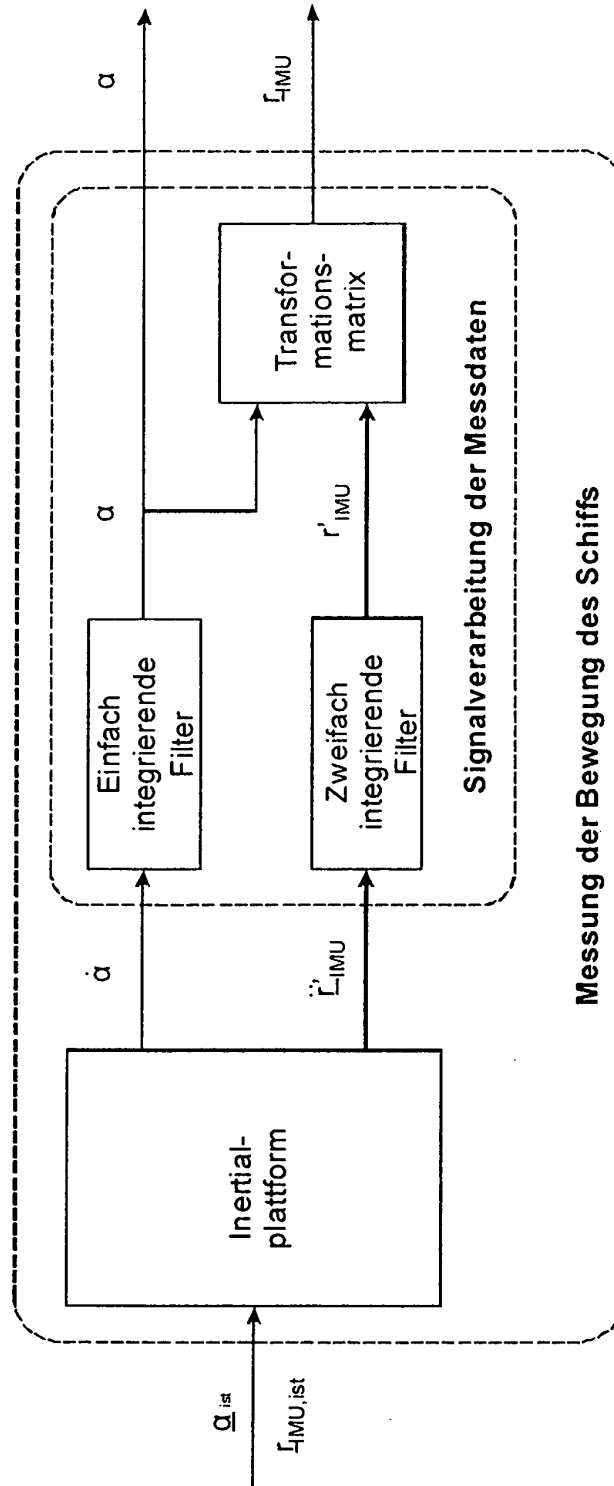


Fig. 3

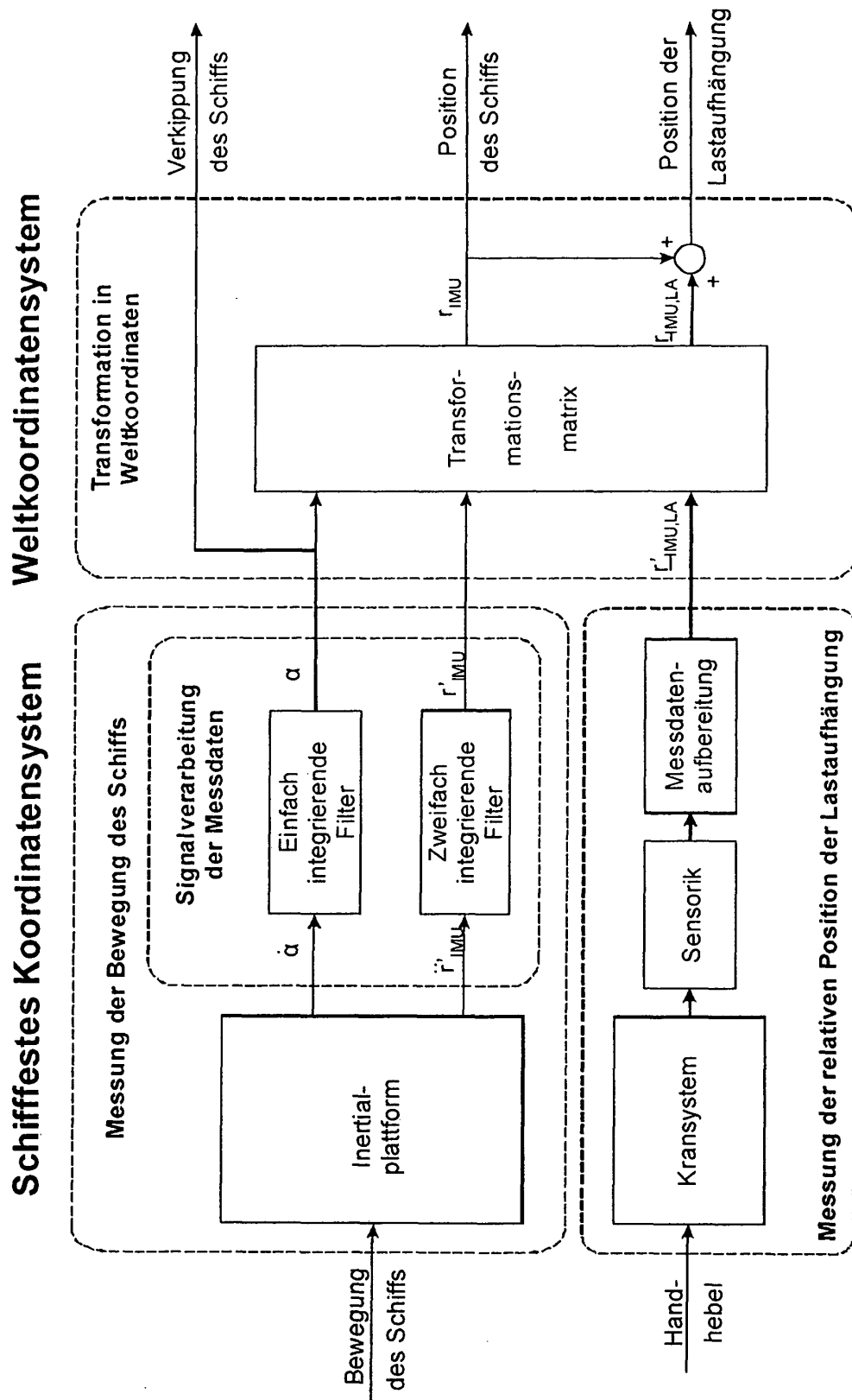


Fig. 4

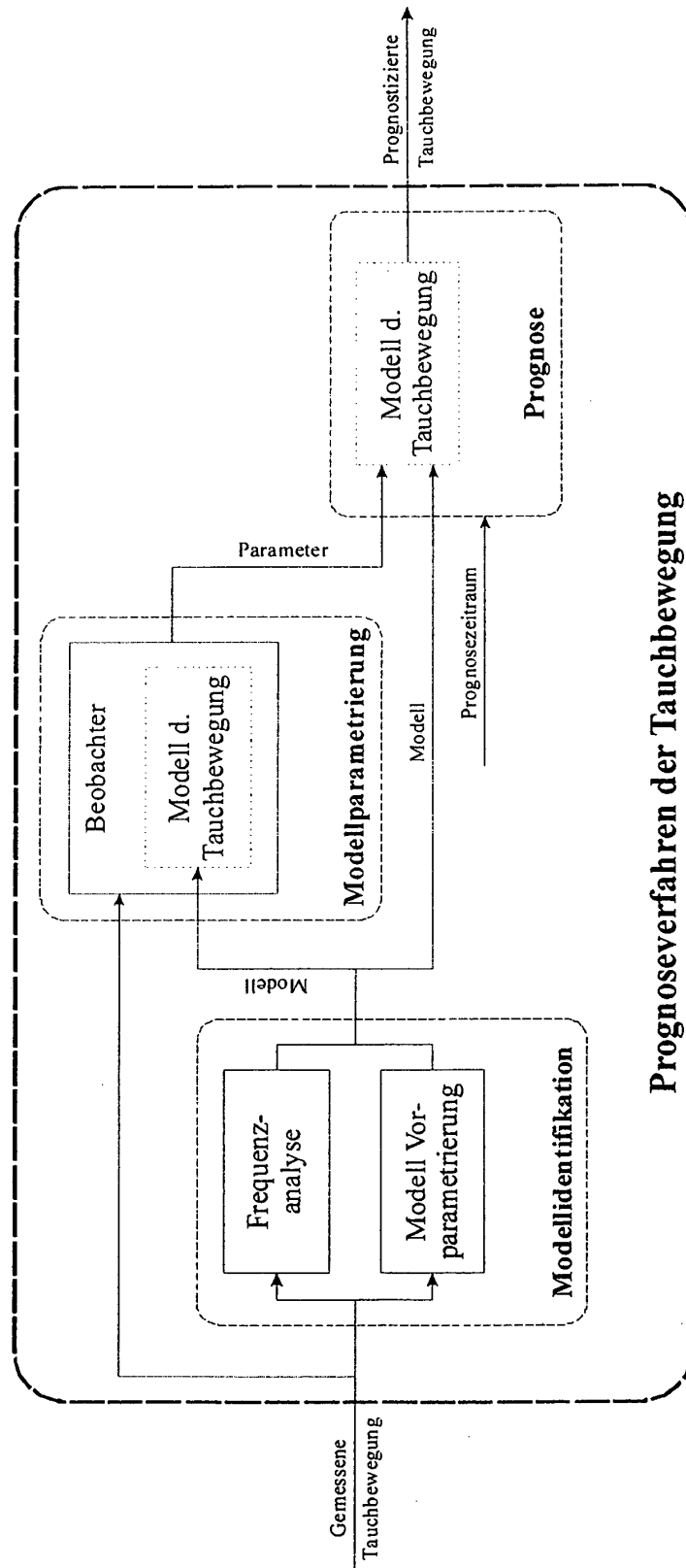


Fig. 5

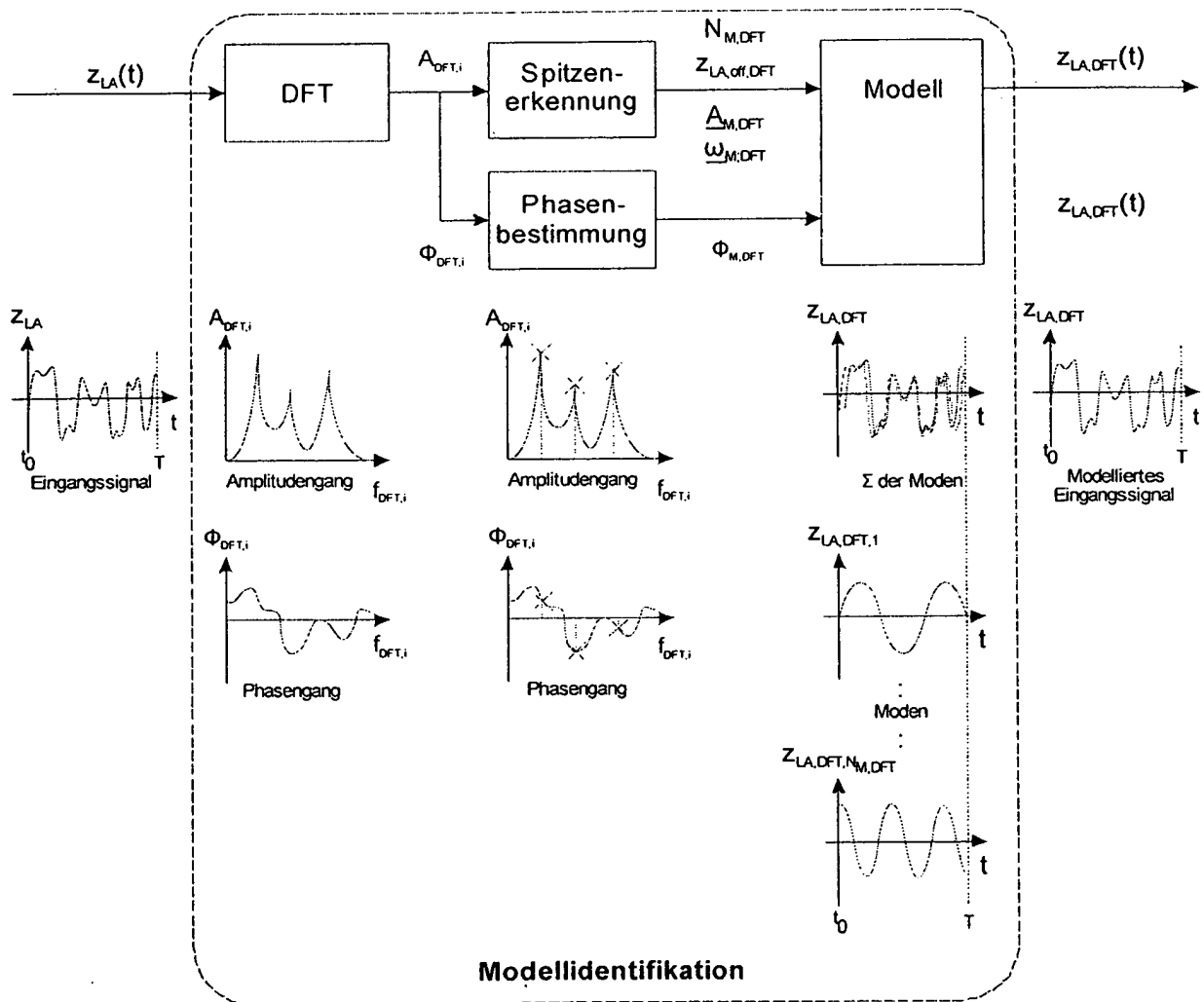


Fig. 6

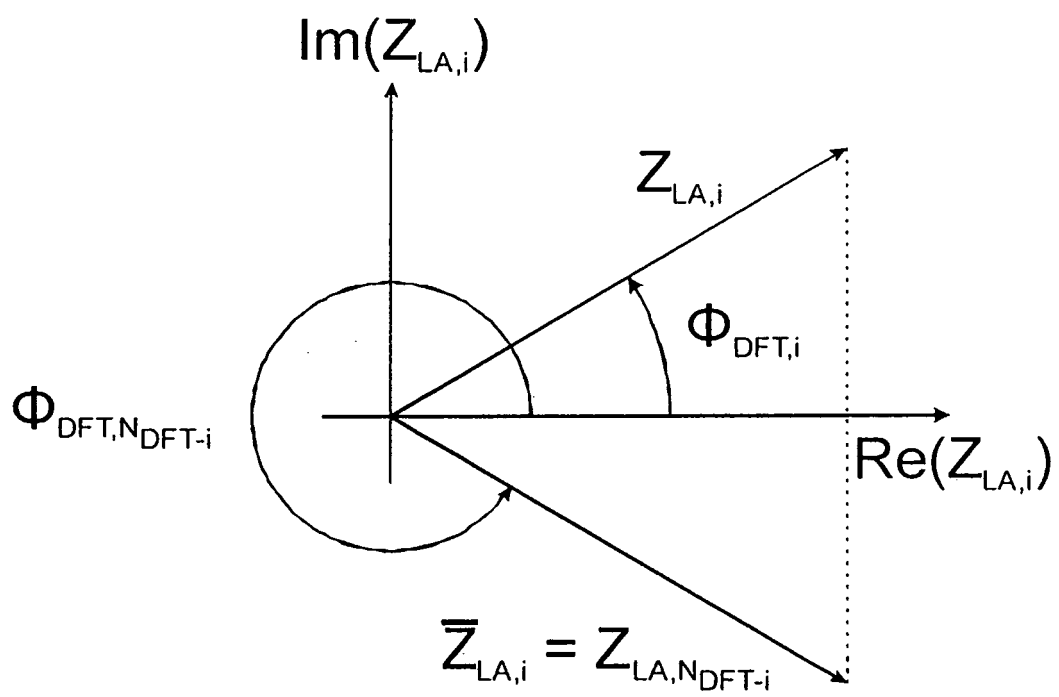


Fig. 7

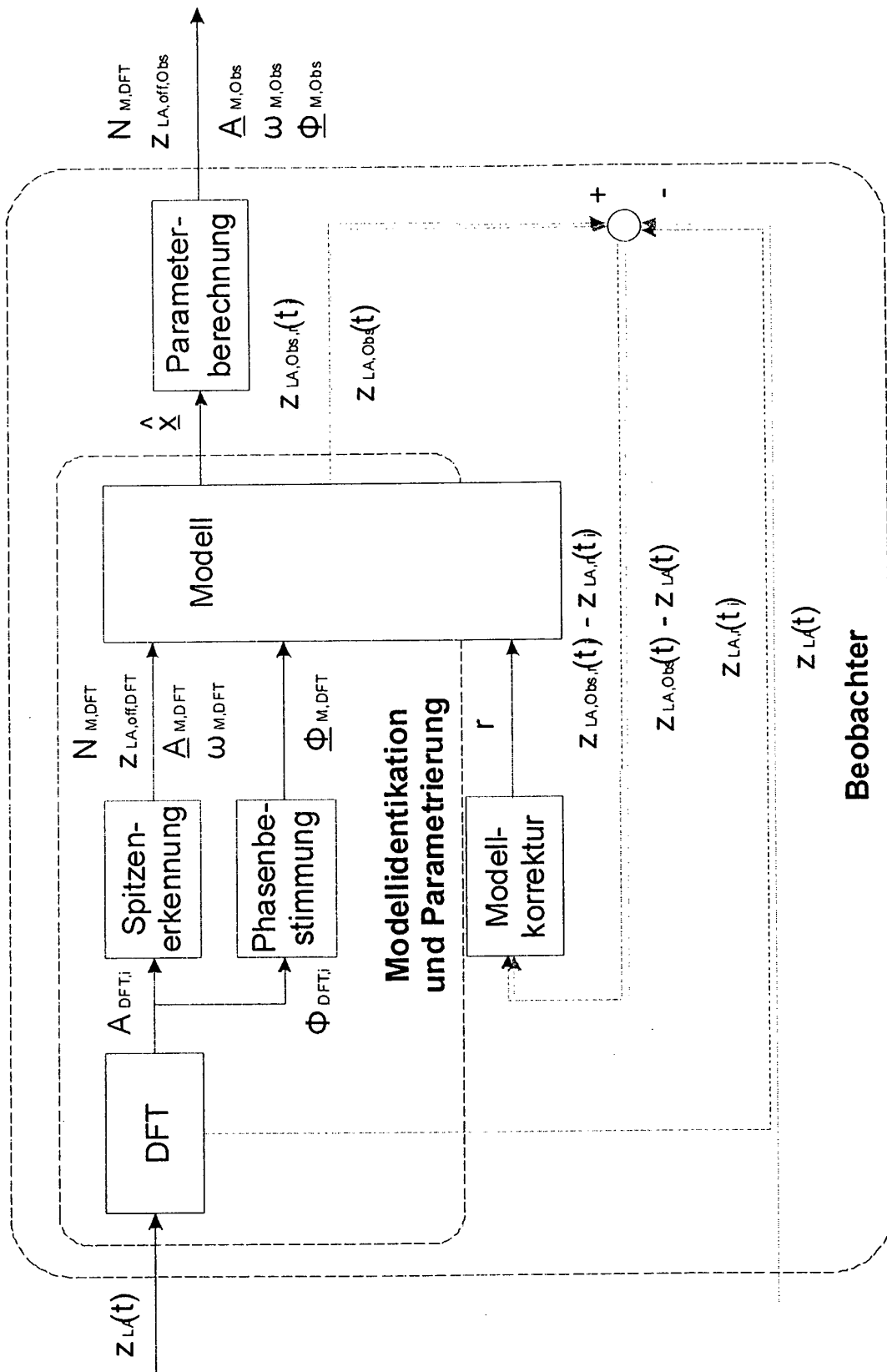


Fig. 8

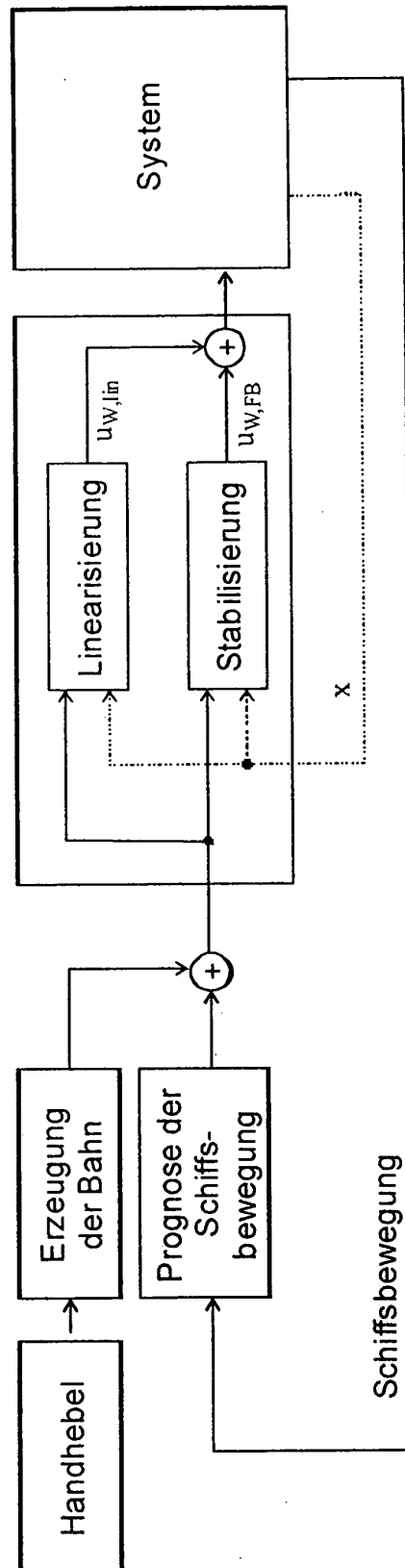


Fig. 9

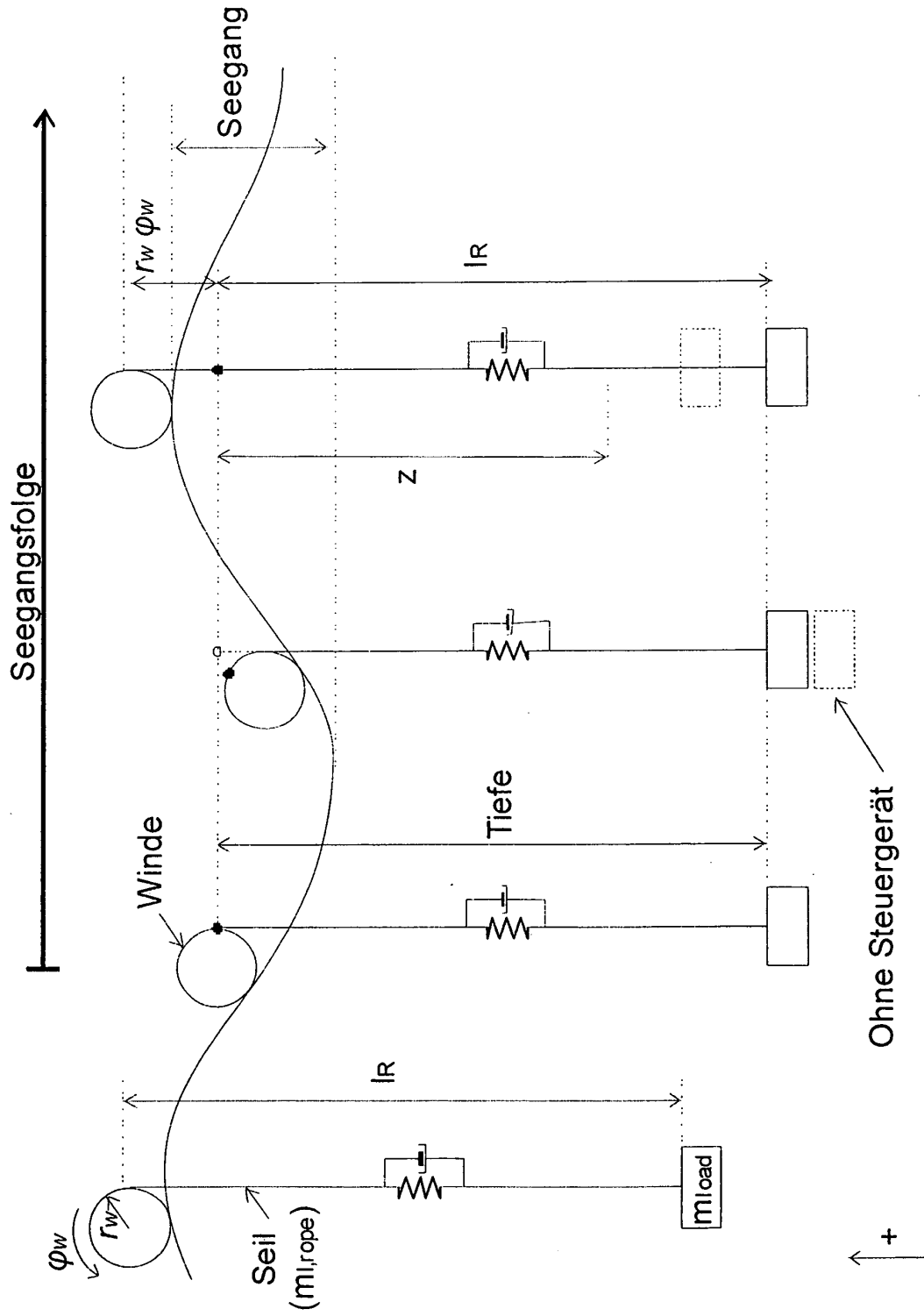


Fig. 10

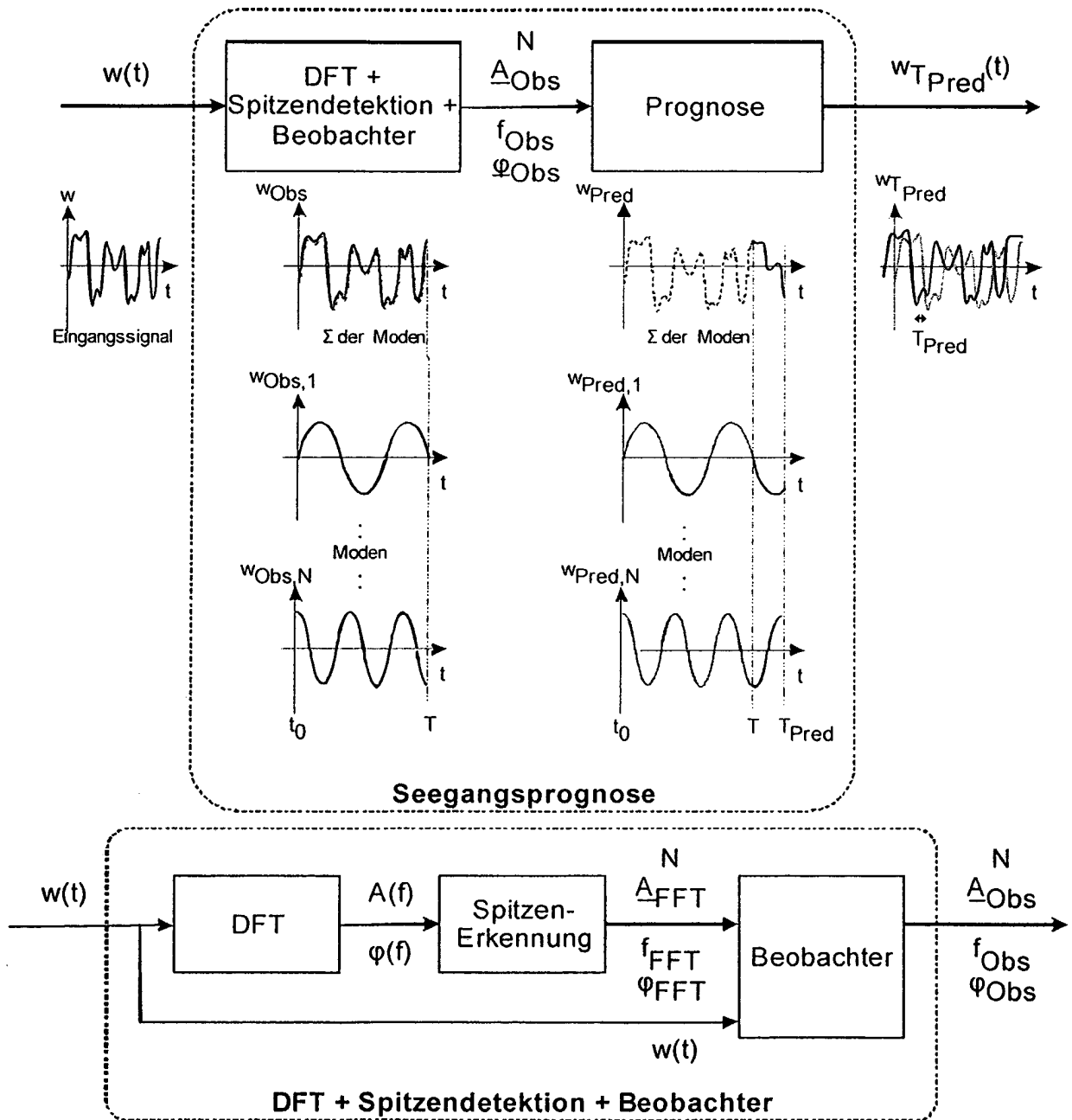


Fig. 11

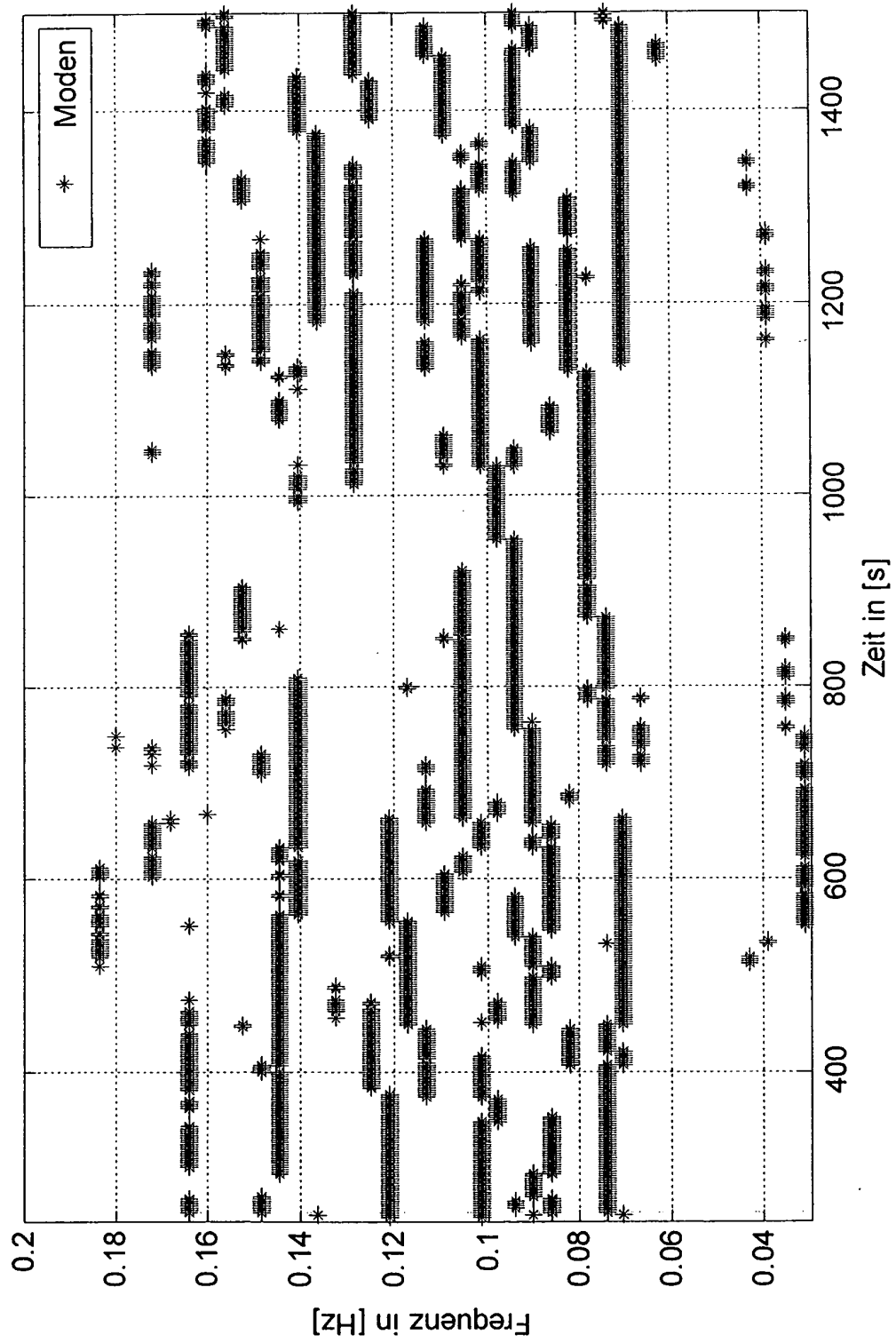


Fig. 12

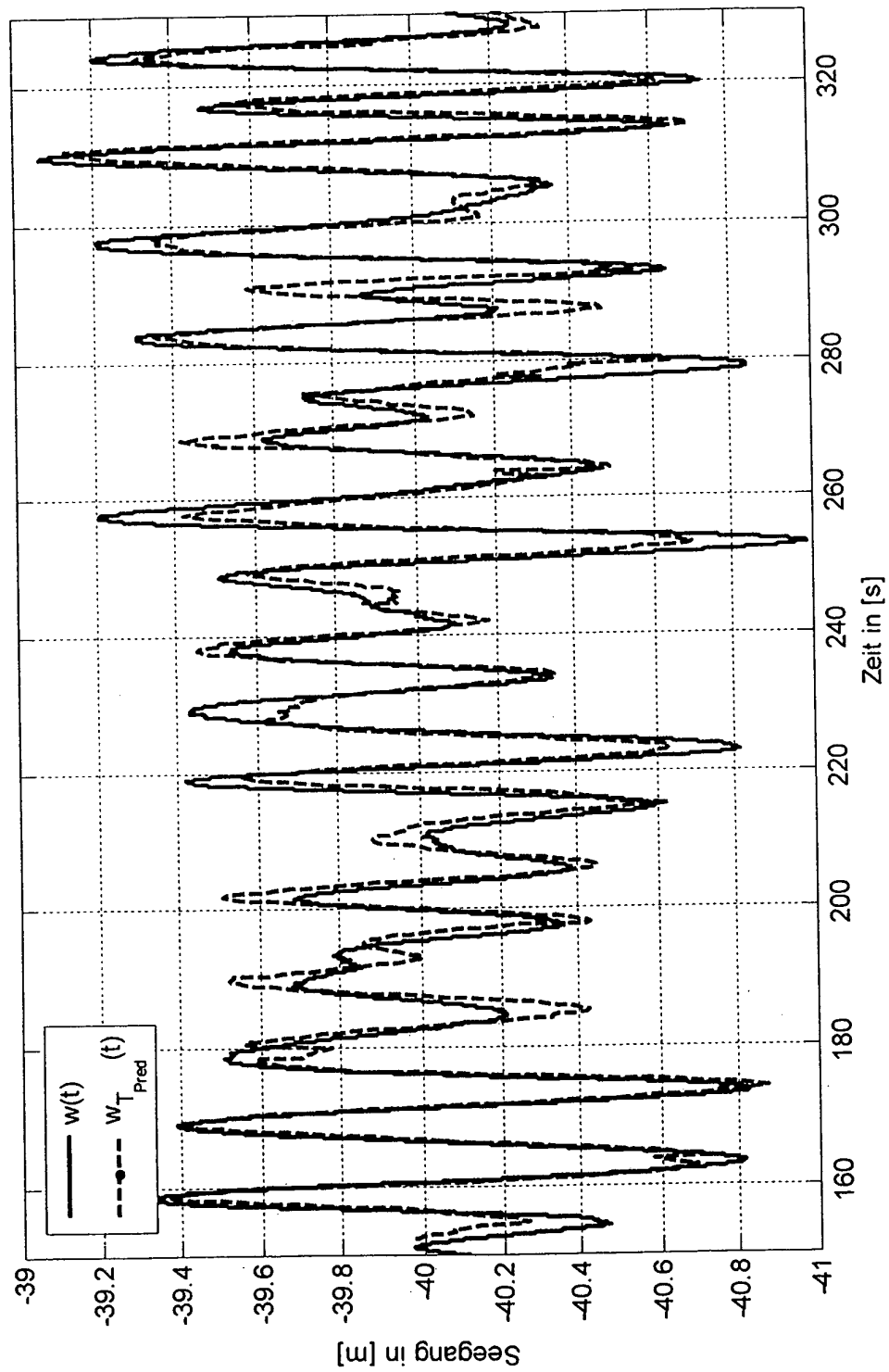


Fig. 13

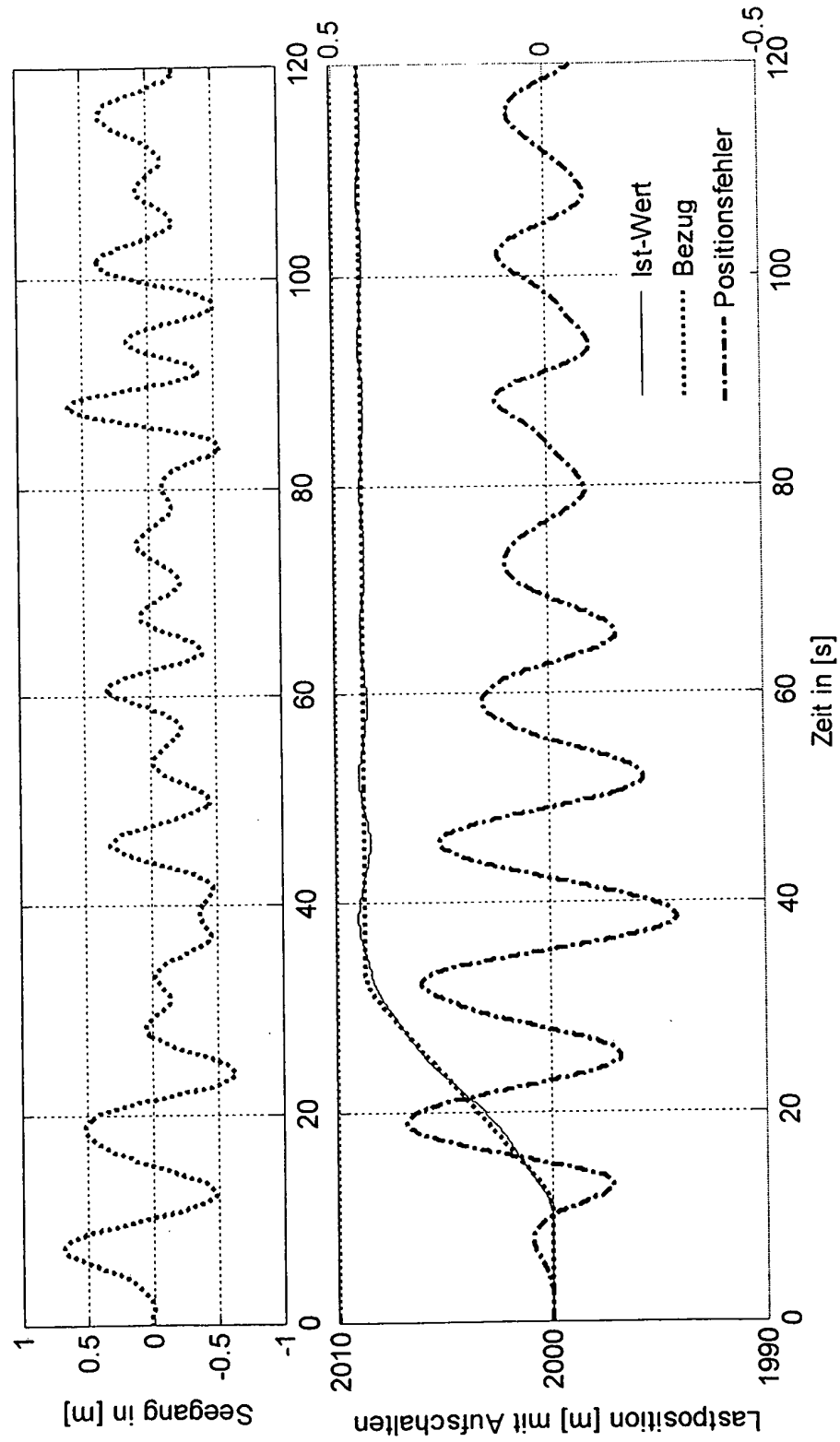


Fig. 14

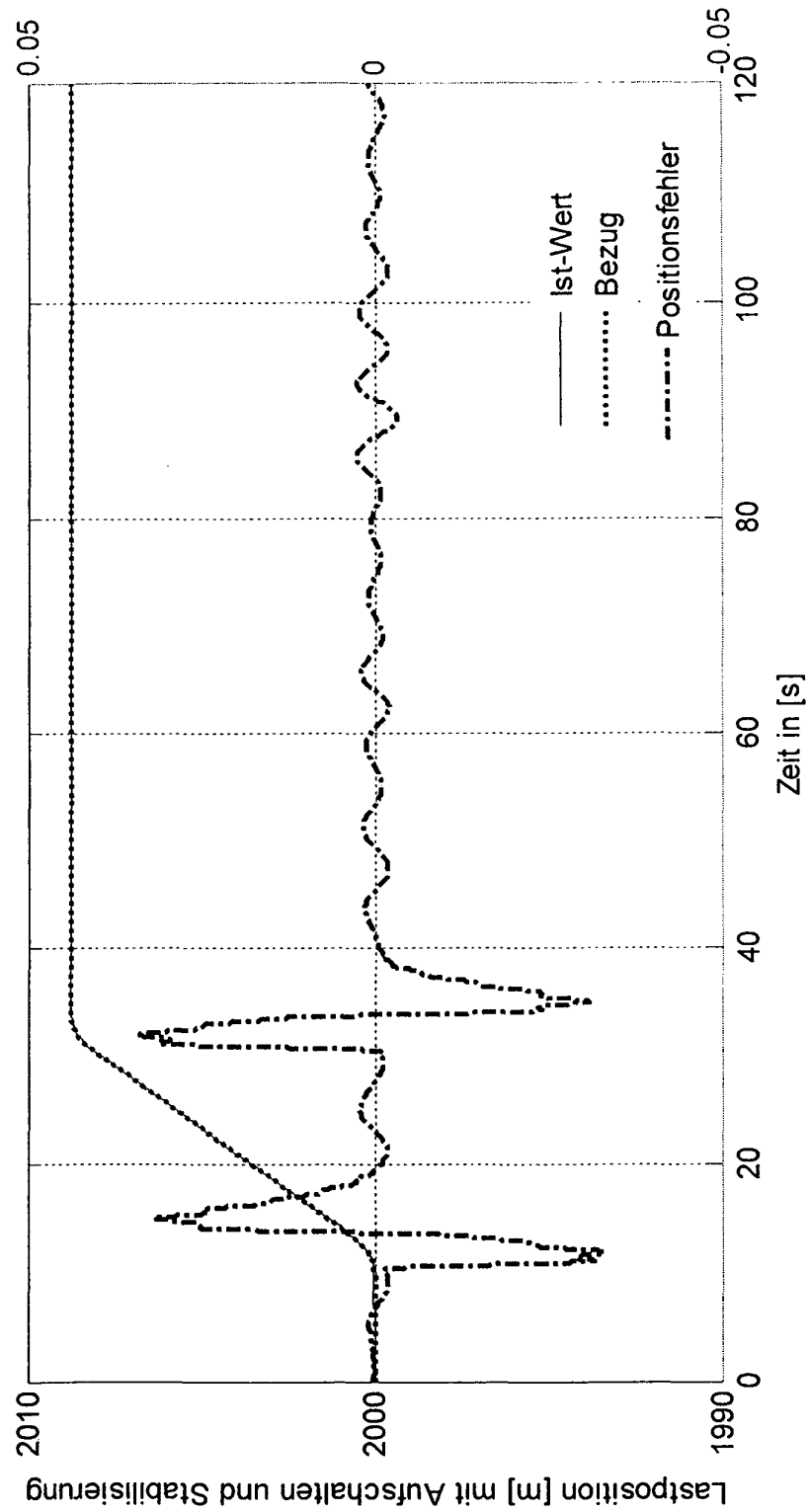
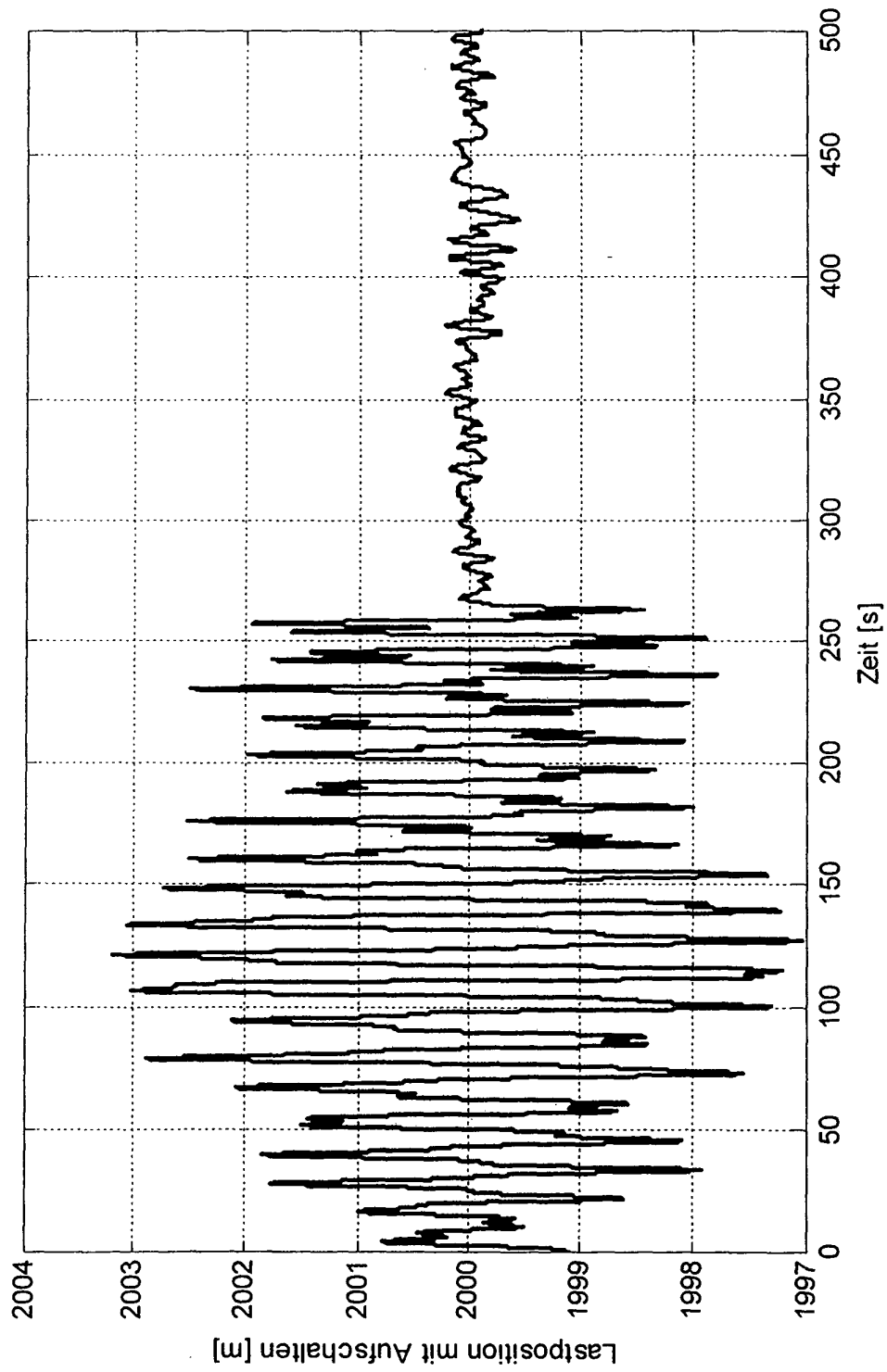


Fig.15



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 Patentdokumente

- EP 1757554 A2 [0006]
- WO 2005090226 A1 [0007]