(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 2 636 632 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
11.09.2013 Patentblatt 2013/37

(51) Int Cl.:
B66C 13/06 *(2006.01)* ***B66D 1/52*** *(2006.01)*

(21) Anmeldenummer: **12008290.4**

(22) Anmeldetag: **12.12.2012**

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

(30) Priorität: **09.03.2012 DE 102012004803**

(71) Anmelder: **Liebherr-Werk Nenzing GmbH**
6710 Nenzing (AT)

(72) Erfinder:
- **Dr. Schneider, Klaus**
  88145 Hergatz (DE)
- **Dr.Ing. Arnold, Eckard**
  98693 Illmenau (DE)
- **Di. Küchler, Sebastian**
  71034 Böblingen (DE)
- **Pof. Dr.-Ing. Sawodny, Oliver**
  70186 Stuttgart (DE)

(74) Vertreter: **Laufhütte, Dieter et al**
Lorenz - Seidler - Gossel
Widenmayerstrasse 23
80538 München (DE)

(54) **Kransteuerung mit Antriebsbeschränkung**

(57) Die vorliegende Erfindung zeigt eine Kransteuerung für einen Kran, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist, mit einer aktiven Seegangskompensation, welche durch eine Ansteuerung des Hubwerks die Bewegung des Seilaufhängepunkts und/oder eines Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgleicht, wobei die Seegangskompensation bei der Berechung der Ansteuerung des Hubwerkes mindestens eine Beschränkung **des Hubwerks berücksichtigt**.

EP 2 636 632 A1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Kransteuerung für einen Kran, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist. Die Kransteuerung verfügt dabei über eine aktive Seegangskompensation, welche durch eine Ansteuerung des Hubwerks die Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgleicht.

[0002] Eine solche Kransteuerung ist aus der DE 10 2008 024513 A1 bekannt. Dabei ist eine Prognosevorrichtung vorgesehen, welche eine zukünftige Bewegung des Seilaufhängepunktes anhand der ermittelten aktuellen Seegangsbewegung und eines Modells der Seegangsbewegung prognostiziert, wobei eine Bahnsteuerung der Last die prognostizierte Bewegung des Seilaufhängepunktes zumindest teilweise ausgleicht.

[0003] Zur Ansteuerung des Hubwerks wird in der DE 10 2008 024513 A1 ein dynamisches Modell der hydraulisch betriebenen Winde und der am Seil hängenden Last aufgestellt und hieraus durch Inversion ein Folgesteuergerät erstellt. Zur Realisierung einer Zustandsregelung werden unbekannte Zustände der Last über einen Beobachter aus einer Kraftmessung rekonstruiert.

[0004] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine verbesserte Kransteuerung zur Verfügung zu stellen.

[0005] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß in einem ersten Aspekt durch eine Kransteuerung gemäß Anspruch 1 und in einem zweiten Aspekt durch eine Kransteuerung gemäß Anspruch 4 gelöst.

[0006] In einem ersten Aspekt zeigt die vorliegende Erfindung eine Kransteuerung für einen Kran, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist. Die Kransteuerung weist dabei eine aktive Seegangskompensation auf, welche durch eine Ansteuerung des Hubwerks die Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgleicht. Erfindungsgemäß ist dabei vorgesehen, dass die Seegangskompensation bei der Berechnung der Ansteuerung des Hubwerks mindestens eine Beschränkung des Hubwerks berücksichtigt. Durch die Berücksichtigung der Beschränkung des Hubwerks wird sichergestellt, dass das Hubwerk den aufgrund der Seegangskompensation berechneten Steuerbefehlen tatsächlich folgen kann und/oder dass das Hubwerk bzw. der Kran durch die Ansteuerung nicht beschädigt wird.

[0007] Erfindungsgemäß kann die Seegangskompensation dabei einen maximal zulässigen Ruck berücksichtigen. Hierdurch wird sichergestellt, dass durch die Ansteuerung des Hubwerks aufgrund der Seegangskompensation das Hubwerk bzw. die Struktur des Kranes nicht beschädigt wird. Neben einem maximal zulässigen Ruck kann weiterhin ein stetiger Verlauf des Ruckes gefordert werden.

[0008] Alternativ oder zusätzlich kann die Seegangskompensation eine maximal zur Verfügung stehende Leistung berücksichtigen.

[0009] Alternativ oder zusätzlich kann die Seegangskompensation eine maximal zur Verfügung stehende Beschleunigung berücksichtigen. Eine solche maximal zur Verfügung stehende Beschleunigung kann sich dabei beispielsweise aus der Maximalleistung des Antriebs des Hubwerks und/oder der Länge des bereits abgewickelten Seils und der hierdurch auf das Hubwerk wirkenden Gewichtskraft des Seils und/oder aufgrund der Belastung des Hubwerks durch die zu hebende Gewichtskraft ergeben.

[0010] Weiterhin alternativ oder zusätzlich kann die Seegangskompensation eine maximal zur Verfügung stehende Geschwindigkeit berücksichtigen. Auch die maximal zur Verfügung stehende Geschwindigkeit für die Seegangskompensation kann sich wie oben im Hinblick auf die maximal zur Verfügung stehende Beschleunigung beschrieben ergeben.

[0011] Weiterhin kann die Kransteuerung eine Berechnungsfunktion aufweisen, welche die mindestens eine Beschränkung des Hubwerks berechnet. Die Berechnungsfunktion kann hierfür insbesondere Sensordaten und/oder Ansteuersignale auswerten. Durch die Berechnungsfunktion können der Seegangskompensation jeweils die aktuell gültigen Beschränkungen des Hubwerks mitgeteilt werden.

[0012] Insbesondere können sich die Beschränkungen des Hubwerks dabei während eines Hubes ändern, was erfindungsgemäß von der Seegangskompensation berücksichtigt werden kann.

[0013] Die Berechnungsfunktion kann dabei eine aktuell zur Verfügung stehende mindestens eine kinematisch beschränkte Größe des Hubwerks, insbesondere die maximal zur Verfügung stehende Leistung und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks jeweils aktuell berechnen. Vorteilhafterweise berücksichtigt die Berechnungsfunktion dabei die Länge des abgewickelten Seils und/oder die Seilkraft und/oder die zum Antrieb des Hubwerks zur Verfügung stehende Leistung.

[0014] Erfindungsgemäß kann die Kransteuerung zur Ansteuerung eines Hubwerks eingesetzt werden, dessen Antrieb mit einem Energiespeicher in Verbindung steht. Die Menge der im Energiespeicher gespeicherte Energie beeinflusst dabei die zum Antrieb des Hubwerks zur Verfügung stehende Leistung. Vorteilhafterweise geht daher die im Energiespeicher gespeicherte Energiemenge bzw. die zum Antrieb des Hubwerks zur Verfügung stehende Leistung in die Berechnungsfunktion gemäß der vorliegenden Erfindung ein.

[0015] Insbesondere kann das erfindungsgemäße Hubwerk dabei hydraulisch angesteuert werden, wobei im Hydraulikkreislauf zum Antrieb der Hubwinde des Hubwerks ein hydraulischer Energiespeicher vorgesehen ist.

[0016] Alternativ kann ein elektrischer Antrieb eingesetzt werden. Auch dieser kann mit einem Energiespeicher in

Verbindung stehen.

[0017] Vorteilhafterweise umfasst die Kransteuerung weiterhin ein Bahnplanungsmodul, welches anhand der prognostizierten Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes und unter Berücksichtigung der Beschränkungen des Hubwerks eine Trajektorie bestimmt. Erfindungsgemäß können so bei der Planung der Trajektorien explizit die Antriebsbeschränkungen berücksichtigt werden, insbesondere die Antriebsbeschränkung im Hinblick auf die Leistung, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und/oder den Ruck. Bei der Trajektorie kann es sich dabei insbesondere um eine Trajektorie der Position und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks handeln.

[0018] Vorteilhafterweise weist das Bahnplanungsmodul eine Optimierungsfunktion auf, welche anhand der prognostizierten Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes und unter Berücksichtigung der Beschränkung des Hubwerks eine Trajektorie bestimmt, welche die Restbewegung der Last aufgrund der Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder die Differenzbewegung zwischen der Last und dem Lastabsetzpunkt aufgrund der Bewegung des Lastabsetzpunktes minimiert. Erfindungsgemäß kann so die mindestens eine Antriebsbeschränkung innerhalb des Optimalsteuerungsproblems berücksichtigt werden. Insbesondere wird dabei innerhalb des Optimalsteuerungsproblems die Beschränkung des Antriebs in Hinblick auf Leistung und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung und/oder Ruck berücksichtigt.

[0019] Die Optimierungsfunktion berechnet dabei vorteilhafterweise anhand einer vorhergesagten Vertikalposition und/oder Vertikalgeschwindigkeit des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes eine optimale Bahn, welche unter Berücksichtigung der kinematischen Beschränkungen die Restbewegung und/oder Differentbewegung der Last minimiert.

[0020] In einem zweiten Aspekt umfasst die vorliegende Erfindung eine Kransteuerung für einen Kran, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist. Die Kransteuerung umfasst dabei eine aktive Seegangskompensation, welche durch eine Ansteuerung des Hubwerks die Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgleicht. Erfindungsgemäß weist die Seegangskompensation dabei ein Bahnplanungsmodul auf, welches anhand einer prognostizierten Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes eine Trajektorie der Position und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks berechnet, welche in einen Sollwert für eine nachgelagerte Regelung des Hubwerks eingeht. Durch diesen Aufbau der Seegangskompensation ergibt sich eine besonders stabile und einfach zu realisierende Ansteuerung des Hubwerks. Insbesondere muss hierbei nicht mehr aufwändig die unbekannte Lastposition rekonstruiert werden.

[0021] Erfindungsgemäß kann dabei die Regelung des Hubwerks Messwerte zu Position und/oder Geschwindigkeit der Hubwinde zurückführen. Das Bahnplanungsmodul gibt damit als Sollwert eine Position und/oder Geschwindigkeit der Hubwinde vor, welche in der nachgelagerten Regelung mit Istwerten abgeglichen wird.

[0022] Weiterhin kann vorgesehen sein, dass die Regelung des Hubwerks die Dynamik des Antriebs der Hubwinde durch eine Vorsteuerung berücksichtigt. Insbesondere kann die Vorsteuerung dabei auf einer Invertierung eines physikalischen Modells beruhen, welches die Dynamik des Antriebs der Hubwinde beschreibt. Insbesondere kann es sich bei der Hubwinde dabei um eine hydraulisch betriebene Hubwinde handeln.

[0023] Der erste und der zweite Aspekt der vorliegenden Erfindung werden durch die vorliegende Anmeldung jeweils separat unter Schutz gestellt und können jeweils separat und ohne den jeweils anderen Aspekt verwirklicht sein.

[0024] Besonders bevorzugt werden jedoch die beiden Aspekte gemäß der vorliegenden Erfindung miteinander kombiniert. Insbesondere kann dabei vorgesehen sein, dass das Bahnplanungsmodul gemäß dem zweiten Aspekt der vorliegenden Erfindung bei der Ermittlung der Trajektorie mindestens eine Beschränkung des Hubwerks berücksichtigt.

[0025] Die Kransteuerung gemäß der vorliegenden Erfindung kann weiterhin eine Bedienersteuerung aufweisen, welche das Hubwerk anhand von Vorgaben des Bedieners ansteuert.

[0026] Vorteilhafterweise weist die Steuerung hierfür zwei getrennte Bahnplanungsmodule auf, über welche getrennt voneinander Trajektorien für die Seegangskompensation und für die Bedienersteuerung berechnet werden. Insbesondere kann es sich bei diesen Trajektorien dabei um Trajektorien für die Position und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks handeln.

[0027] Weiterhin können die durch die zwei getrennten Bahnplanungsmodule vorgegebenen Trajektorien summiert werden und als Sollwerte für die Steuerung und/oder Regelung des Hubwerks dienen.

[0028] Weiterhin kann erfindungsgemäß vorgesehen sein, dass die Aufteilung mindestens einer kinematisch beschränkten Größe zwischen Seegangskompensation und Bedienersteuerung einstellbar ist, wobei die Einstellung beispielsweise über einen Gewichtungsfaktor erfolgen kann, über welchen die maximal zur Verfügung stehende Leistung und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks zwischen der Seegangskompensation und der Bedienersteuerung aufgeteilt wird.

[0029] Eine solche Aufteilung ist bei der erfindungsgemäßen Seegangskompensation, welche Beschränkungen des Hubwerks ohnehin berücksichtigt, problemlos möglich. Insbesondere wird dabei die Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe als Beschränkung des Hubwerks berücksichtigt. Vorteilhafterweise berücksichtigt auch die Bedienersteuerung mindestens eine Beschränkung des Antriebs, und insbesondere den maximal zulässigen Ruck

und/oder eine maximal zur Verfügung stehende Leistung und/oder und/oder eine maximal zur Verfügung stehende Beschleunigung und/oder eine maximal zur Verfügung stehende Geschwindigkeit.

[0030] Erfindungsgemäß kann die Optimierungsfunktion der Seegangskompensation eine Solltrajektorie bestimmen, welche in die Steuerung und/oder Regelung des Hubwerks eingeht. Insbesondere kann die Optimierungsfunktion dabei wie oben beschrieben eine Solltrajektorie der Position und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks berechnen, welche in einen Sollwert für eine nachgelagerte Regelung des Hubwerks eingeht. Die Optimierung kann dabei über eine Diskretisierung erfolgen.

[0031] Erfindungsgemäß kann die Optimierung dabei bei jedem Zeitschritt auf Grundlage einer aktualisierten Prognose der Bewegung des Lastaufnahmepunktes erfolgen.

[0032] Erfindungsgemäß kann jeweils der erste Wert der Soll-Trajektorie zur Regelung des Hubwerks herangezogen werden. Steht dann eine aktualisierte Soll-Trajektorie zur Verfügung, wird wiederum nur deren erster Wert zur Regelung herangezogen.

[0033] Erfindungsgemäß kann die Optimierungsfunktion mit einer niedrigeren Abtastrate arbeiten als die Regelung. Dies ermöglicht es, für die rechenintensive Optimierungsfunktion größere Abtastzeiten zu wählen, für die weniger rechenintensive Regelung dagegen eine größere Genauigkeit durch niedrigere Abtastzeiten zu erreichen.

[0034] Weiterhin kann vorgesehen sein, dass die Optimierungsfunktion auf eine Notfalltrajektorienplanung zurückgreift, wenn keine gültige Lösung auffindbar ist. Hierdurch wird ein ordnungsgemäßer Betrieb auch dann sichergestellt, wenn eine gültige Lösung nicht gefunden werden kann.

[0035] Die Kransteuerung gemäß der vorliegenden Erfindung kann eine Messvorrichtung umfassen, welche eine aktuelle Seegangsbewegung aus den Sensordaten ermittelt. Beispielsweise können dabei als Sensoren Gyroskope und/oder Neigungssensoren zum Einsatz kommen. Die Sensoren können dabei am Kran oder an einem Schwimmkörper, auf welchem der Kran angeordnet ist, angeordnet sein, beispielsweise an der Kranbasis, und/oder an einem Schwimmkörper, an welchem die Lastabsetzposition angeordnet ist.

[0036] Die Kransteuerung kann weiterhin eine Prognosevorrichtung umfassen, welche eine zukünftige Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes anhand der ermittelten aktuellen Seegangsbewegung und eines Modells der Seegangsbewegung prognostiziert.

[0037] Vorteilhafterweise ist das in der Prognosevorrichtung verwendete Modell der Seegangsbewegung dabei unabhängig von den Eigenschaften, und insbesondere unabhängig von der Dynamik des Schwimmkörpers. Hierdurch kann die Kransteuerung unabhängig von dem Schwimmkörper, auf welchem der Kran und/oder die Lastabsetzposition angeordnet ist, verwendet werden.

[0038] Die Prognosevorrichtung kann dabei die vorherrschenden Moden der Seegangsbewegung aus den Daten der Messvorrichtung bestimmen. Insbesondere kann dies über eine Frequenzanalyse erfolgen.

[0039] Weiterhin kann die Prognosevorrichtung anhand der bestimmten vorherrschenden Moden ein Modell des Seegangs erstellen. Anhand dieses Modells kann dann die zukünftige Seegangsbewegung prognostiziert werden.

[0040] Vorteilhafterweise parametrisiert die Prognosevorrichtung dabei das Modell anhand der Daten der Messvorrichtung laufend. Insbesondere kann dabei ein Beobachter eingesetzt werden, welcher laufend parametrisiert wird. Besonders bevorzugt können dabei die Amplitude und die Phase der Moden parametrisiert werden.

[0041] Weiterhin kann vorgesehen sein, dass bei einer Änderung der vorherrschenden Moden des Seegangs das Modell aktualisiert wird.

[0042] Besonders bevorzugt kann die Prognosevorrichtung sowie die Messvorrichtung dabei so ausgeführt sein, wie dies in der DE 10 2008 024513 A1 beschrieben ist, deren Inhalt vollumfänglich zum Gegenstand der vorliegenden Anmeldung gemacht wird.

[0043] Weiterhin vorteilhafterweise kann bei dem Regelungskonzept gemäß der vorliegenden Erfindung die Dynamik der Last aufgrund der Dehnbarkeit des Seiles vernachlässigt werden. Hierdurch ergibt sich ein deutlich einfacher Aufbau der Regelung.

[0044] Die vorliegende Erfindung umfasst weiterhin einen Kran mit einer Kransteuerung, wie sie oben beschrieben wurde.

[0045] Insbesondere kann der Kran dabei auf einem Schwimmkörper angeordnet sein. Insbesondere kann es sich bei dem Kran um einen Schiffskran handeln. Alternativ kann es sich auch um einen Offshorekran, einen Hafenkran oder einen Seilbagger handeln.

[0046] Die vorliegende Erfindung umfasst weiterhin einen Schwimmkörper mit einem Kran gemäß der vorliegenden Erfindung, insbesondere ein Schiff mit einem erfindungsgemäßen Kran.

[0047] Weiterhin umfasst die vorliegende Erfindung die Verwendung eines erfindungsgemäßen Krans bzw. einer erfindungsgemäßen Kransteuerung zum Anheben und/oder Absenken einer sich im Wasser befindlichen Last und/oder die Verwendung eines erfindungsgemäßen Krans bzw. einer erfindungsgemäßen Kransteuerung zum Anheben und/oder Absenken einer Last von und/oder auf eine im Wasser befindliche Lastabsetzposition, bspw. auf ein Schiff. Insbesondere umfasst die vorliegende Erfindung dabei die Verwendung des erfindungsgemäßen Krans bzw. der erfindungsgemäßen Kransteuerung für Tiefseehübe und/oder das Be- und/oder Entladen von Schiffen.

[0048] Die vorliegende Erfindung umfasst weiterhin ein Verfahren zur Steuerung eines Krans, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist. Dabei gleicht eine Seegangskompensation durch eine automatische Ansteuerung des Hubwerks die Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise aus. Erfindungsgemäß ist dabei gemäß einem ersten Aspekt vorgesehen, dass die Seegangskompensation bei der Berechnung der Ansteuerung des Hubwerks mindestens eine Beschränkung des Hubwerks berücksichtigt. Gemäß einem zweiten Aspekt ist dagegen vorgesehen, dass die Seegangskompensation anhand einer prognostizierten Bewegung des Seilaufhängepunktes eine Trajektorie der Position und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks berechnet, welche in einen Sollwert für eine nachgelagerte Regelung des Hubwerks eingeht. Das erfindungsgemäße Verfahren hat dabei die gleichen Vorteile, welche bereits im Hinblick auf die Kransteuerung beschrieben wurden.

[0049] Weiterhin kann das Verfahren dabei so ausgeführt werden, wie dies ebenfalls oben beschrieben wurde. Insbesondere können dabei die beiden Aspekte gemäß der vorliegenden Erfindung auch beim Verfahren kombiniert werden.

[0050] Weiterhin kann das erfindungsgemäße Verfahren bevorzugt mittels einer Kransteuerung erfolgen, wie sie oben dargestellt wurde.

[0051] Die vorliegende Erfindung umfasst weiterhin Software mit Code zur Durchführung als erfindungsgemäßes Verfahren. Insbesondere kann die Software dabei auf einem maschinenlesbaren Datenträger abgespeichert sein. Vorteilhafterweise kann durch Aufspielen der Software auf eine Kransteuerung dabei eine erfindungsgemäße Kransteuerung implementiert werden.

[0052] Vorteilhafterweise ist die erfindungsgemäße Kransteuerung dabei elektronisch verwirklicht, insbesondere durch einen elektronischen Steuerrechner. Der Steuerrechner steht dabei vorteilhafterweise mit Sensoren in Verbindung. Insbesondere kann der Steuerrechner dabei mit der Messvorrichtung in Verbindung stehen. Vorteilhafterweise erzeugt der Steuerrechner dabei Steuersignale zur Ansteuerung des Hubwerks.

[0053] Bei dem Hubwerk kann es sich dabei bevorzugt um ein hydraulisch angetriebenes Hubwerk handeln. Der Steuerrechnung der erfindungsgemäßen Kransteuerung kann dabei erfindungsgemäß den Schwenkwinkel mindestens einer hydraulischen Verdrängermaschinen des hydraulischen Antriebssystems und/oder mindestens ein Ventil des hydraulischen Antriebssystems ansteuern.

[0054] Bevorzugt ist dabei ein Hydraulikspeicher im hydraulischen Antriebssystem vorgesehen, über welchen beim Absenken der Last Energie gespeichert werden kann, welche dann beim Anheben der Last als zusätzliche Leistung zur Verfügung steht.

[0055] Vorteilhafterweise erfolgt die Ansteuerung des Hydraulikspeichers dabei separat zur erfindungsgemäßen Ansteuerung des Hubwerks.

[0056] Alternativ kann auch ein elektrischer Antrieb zum Einsatz kommen. Auch dieser kann einen Energiespeicher umfassen.

[0057] Die vorliegende Erfindung wird nun anhand von Ausführungsbeispielen sowie Zeichnungen näher beschrieben.

[0058] Dabei zeigen:

Figur 0: einen auf einem Schwimmkörper angeordneten Kran gemäß der vorliegenden Erfindung,

Figur 1: die Struktur einer getrennten Trajektorienplanung für die Seegangskompensation und die Bedienersteuerung,

Figur 2: eine Integratorkette vierter Ordnung zur Planung von Trajektorien mit stetigem Ruck,

Figur 3: eine nicht äquidistante Diskretisierung für die Trajektorienplanung, welche gegen Ende des Zeithorizontes größere Abstände verwendet als zu Anfang des Zeithorizontes,

Figur 4: die Berücksichtigung von sich ändernden Beschränkungen zunächst am Ende des Zeithorizontes am Beispiel der Geschwindigkeit,

Figur 5: die für die Trajektorienplanung der Bedienersteuerung verwendete Integratorkette dritter Ordnung, welche anhand einer Ruckaufschaltung arbeitet,

Figur 6: die Struktur der Bahnplanung der Bedienersteuerung, welche Beschränkungen des Antriebs berücksichtigt,

Figur 7: ein beispielhafter Ruckverlauf mit zugehörigen Schaltzeiten, aus welchen anhand der Bahnplanung eine Trajektorie für die Position und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks berechnet wird,

Figur 8: ein mit der Ruckaufschaltung generierter Verlauf einer Geschwindigkeits- und Beschleunigungstrajektorie,

Figur 9: eine Übersicht über das Ansteuerungskonzept mit einer aktiven Seegangskompensation und einem Sollkraftmodus, hier als Konstantspannungsmodus bezeichnet,

Figur 10: ein Blockschaltbild der Ansteuerung für die aktive Seegangskompensation und

Figur 11: ein Blockschaltbild der Ansteuerung für den Sollkraftmodus.

[0059] Figur 0 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Kranes 1 mit einer erfindungsgemäßen Kransteuerung zur Ansteuerung des Hubwerks 5. Das Hubwerk 5 weist eine Hubwinde auf, welche das Seil 4 bewegt. Das Seil 4 ist über einen Seilaufhängepunkt 2, im Ausführungsbeispiel eine Umlenkrolle am Ende des Kranauslegers, am Kran geführt. Durch das Bewegen des Seiles 4 kann eine am Seil hängende Last 3 angehoben oder abgesenkt werden.

[0060] Dabei kann mindestens ein Sensor vorgesehen sein, welche die Position und/oder Geschwindigkeit des Hubwerkes misst und entsprechende Signale an die Kransteuerung übermittelt.

[0061] Weiterhin kann mindestens ein Sensor vorgesehen sein, welche die Seilkraft misst und entsprechende Signale an die Kransteuerung übermittelt. Der Sensor kann dabei im Bereich des Kranaufbaus angeordnet sein, insbesondere in einer Befestigung der Winde 5 und/oder in einer Befestigung der Seilrolle 2.

[0062] Der Kran 1 ist im Ausführungsbeispiel auf einem Schwimmkörper 6 angeordnet, hier einem Schiff. Wie ebenfalls in Figur 0 zu erkennen, bewegt sich der Schwimmkörper 6 aufgrund des Seegangs um seine sechs Freiheitsgrade. Hierdurch wird auch der auf dem Schwimmkörper 6 angeordnete Kran 1 sowie der Seilaufhängepunkt 2 bewegt.

[0063] Die Kransteuerung gemäß der vorliegenden Erfindung kann eine aktive Seegangskompensation aufweisen, welche durch eine Ansteuerung des Hubwerks und die Bewegung des Seilaufhängepunktes 2 aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgleicht. Insbesondere wird dabei die vertikale Bewegung des Seilaufhängepunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgeglichen.

[0064] Die Seegangskompensation kann eine Messvorrichtung umfassen, welche eine aktuelle Seegangsbewegung aus Sensordaten ermittelt. Die Messvorrichtung kann dabei Sensoren umfassen, welche am Kranfundament angeordnet sind. Insbesondere kann es sich dabei um Gyroskope und/oder Neigungswinkelsensoren handeln. Besonders bevorzugt sind drei Gyroskope und drei Neigungswinkelsensoren vorgesehen.

[0065] Weiterhin kann eine Prognosevorrichtung vorgesehen sein, welche eine zukünftige Bewegung des Seilaufhängepunktes 2 anhand der ermittelten Seegangsbewegung und eines Modells der Seegangsbewegung prognostiziert. Insbesondere prognostiziert die Prognosevorrichtung dabei allein die vertikale Bewegung des Seilaufhängepunktes. Ggfls. kann dabei im Rahmen der Mess- und/oder der Prognosevorrichtung eine Bewegung des Schiffes am Punkt der Sensoren der Messvorrichtung in eine Bewegung des Seilaufhängepunktes umgerechnet werden.

[0066] Die Prognosevorrichtung und die Messvorrichtung sind vorteilhafterweise so ausgeführt, wie dies in der DE 10 2008 024513 A1 ausführlicher beschrieben ist.

[0067] Alternativ könnte es sich bei dem erfindungsgemäßen Kran auch um einen Kran handeln, welcher zum Anheben und/oder Absenken einer Last von bzw. auf einen auf einem Schwimmkörper angeordneten Lastabsetzpunkt eingesetzt wird, welcher sich daher mit dem Seegang bewegt. Die Prognosevorrichtung muss in diesem Fall die zukünftige Bewegung des Lastabsetzpunktes prognostizieren. Dies kann analog zu dem oben beschrieben Vorgehen erfolgen, wobei die Sensoren der Messvorrichtung auf dem Schwimmkörper des Lastabsetzpunktes angeordnet sind. Bei dem Kran kann es sich dabei bspw. um einen Hafenkran, einen Offshorekran oder einen Seilbagger handeln.

[0068] Die Hubwinde des Hubwerks 5 ist im Ausführungsbeispiel hydraulisch angetrieben. Insbesondere ist dabei ein Hydraulikkreislauf aus Hydraulikpumpe und Hydraulikmotor vorgesehen, über welchen die Hubwinde angetrieben wird. Bevorzugt kann dabei ein Hydraulikspeicher vorgesehen sein, über welchen Energie beim Absenken der Last gespeichert wird, so dass diese Energie beim Anheben der Last zur Verfügung steht.

[0069] Alternativ könnte ein elektrischer Antrieb eingesetzt werden. Auch dieser könnte mit einem Energiespeicher verbunden werden.

[0070] Im Folgenden wird nun ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung gezeigt, bei welchem eine Vielzahl von Aspekten der vorliegenden Erfindung gemeinsam verwirklicht sind. Die einzelnen Aspekte können jedoch auch jeweils getrennt voneinander zur Weiterbildung der im allgemeinen Teil der vorliegenden Anmeldung beschriebenen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung herangezogen werden.

1 Planung von Referenztrajektorien

[0071] Zur Umsetzung des geforderten prädiktiven Verhaltens der aktiven Seegangskompensation wird im Ausführungsbeispiel eine aus einer Vorsteuerung und einer Rückführung in Form einer Zwei-Freiheitsgrade-Struktur bestehende Folgeregelung eingesetzt. Die Vorsteuerung berechnet sich dabei durch eine differentielle Parametrierung und

setzt zweifach stetig differenzierbare Referenztrajektorien voraus. Entscheidend bei der Planung ist, dass der Antrieb den vorgegebenen Trajektorien folgen kann. Somit müssen auch Beschränkungen des Hubwerkes beachtet werden.

Ausgangspunkt für die Betrachtung sind die Vertikalposition und/oder - geschwindigkeit des Seilaufhängepunkts $\tilde{z}_a^h$

und $\dot{\tilde{z}}_a^h$, welche z.B. mit Hilfe des in der DE 10 2008 024 513 beschriebenen Algorithmus über einen festen Zeithorizont vorhergesagt werden. Zusätzlich wird bei der Trajektorienplanung noch das Handhebelsignal des Kranfahrers, über das er die Last im inertialen Koordinatensystem verfährt, miteinbezogen.

[0072] Aus Sicherheitsgründen ist es notwendig, dass sich die Winde auch bei einem Ausfall der aktiven Seegangskompensation weiterhin über das Handhebelsignal verfahren lässt. Daher erfolgt bei dem verwendeten Konzept zur Trajektorienplanung eine Trennung zwischen der Planung der Referenztrajektorien für die Kompensationsbewegung und derer infolge eines Handhebelsignals, wie dies in Fig. 1 dargestellt ist.

[0073] In der Abbildung bezeichnen y_a^*, $\dot{y}_a^*$ und $\ddot{y}_a^*$ die für die Kompensation geplante Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung und y_l^*, $\dot{y}_l^*$ und $\ddot{y}_l^*$ die auf Basis des Handhebelsignals geplante Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung zum überlagerten Ab- oder Aufwickeln des Seils. Innerhalb des weiteren Verlaufs der Ausführung werden geplante Referenztrajektorien für die Bewegung der Hubwinde grundsätzlich mit y^*, $\dot{y}^*$ bzw. $\ddot{y}^*$ bezeichnet, da sie als Referenz für den Systemausgang der Antriebsdynamik dienen.

[0074] Aufgrund der getrennten Trajektorienplanung ist es möglich, bei ausgeschalteter Seegangskompensation oder bei einem kompletten Ausfall der Seegangskompensation (z. B. durch Ausfall der IMU) für die Handhebelsteuerung im manuellen Betrieb die gleiche Trajektorienplanung und den gleichen Folgeregler zu verwenden und dadurch ein identisches Fahrverhalten wie bei eingeschalteter Seegangskompensation zu erzeugen.

[0075] Um die gegebenen Beschränkungen in Geschwindigkeit v_{max} und Beschleunigung a_{max} trotz der komplett unabhängigen Planung nicht zu verletzen, werden v_{max} und a_{max} mit Hilfe eines Gewichtungsfaktors $0 \leq k_l \leq 1$ 1 aufgeteilt (vgl. Fig. 1). Dieser wird durch den Kranfahrer vorgegeben und ermöglicht damit die individuelle Aufteilung der Leistung, welche für die Kompensation bzw. das Verfahren der Last zur Verfügung steht. Somit folgt für die maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung der Kompensationsbewegung $(1-k_l)v_{max}$ und $(1-k_l)a_{max}$ sowie für die Trajektorien zum überlagerten Ab- und Aufwickeln des Seils $k_l v_{max}$ und $k_l a_{max}$.

[0076] Eine Änderung von k_l lässt sich dabei während des Betriebs durchführen. Da die maximal mögliche Verfahrgeschwindigkeit bzw. -beschleunigung abhängig von der Gesamtmasse aus Seil und Last sind, können sich auch v_{max} und a_{max} im Betrieb ändern. Deshalb werden die jeweils gültigen Werte ebenfalls an die Trajektorienplanung übergeben.

[0077] Durch die Aufteilung der Leistung nutzt man zwar die Stellgrößenbeschränkungen unter Umständen nicht vollständig aus, doch kann der Kranfahrer den Einfluss der aktiven Seegangskompensation einfach und intuitiv einstellen.

[0078] Eine Gewichtung von $k_l = 1$ ist gleichzusetzen mit einem Ausschalten der aktiven Seegangskompensation, wodurch sich ein glatter Übergang zwischen ein- und ausgeschalteter Kompensation ermöglichen lässt.

[0079] Der erste Teil des Kapitels erläutert zunächst die Generierung der Referenztrajektorien y_a^*, $\dot{y}_a^*$ und $\ddot{y}_a^*$ zur Kompensation der Vertikalbewegung des Seilaufhängepunkts. Der wesentliche Aspekt hierbei ist, dass mit den geplanten Trajektorien die Vertikalbewegung so weit kompensiert wird, wie es aufgrund der gegebenen und durch k_l eingestellten Beschränkungen möglich ist.

[0080] Daher wird zunächst mit Hilfe der über einen kompletten Zeithorizont vorhergesagten Vertikalpositionen und -geschwindigkeiten des Seilaufhängepunkts $\tilde{\mathbf{z}}_a^h = \left[\tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,1}) \quad \ldots \quad \tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,K_p})\right]^T$ und $\dot{\tilde{\mathbf{z}}}_a^h = \left[\dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,1}) \quad \ldots \quad \dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,K_p})\right]^T$ ein Optimalsteuerungsproblem formuliert, welches zyklisch gelöst wird, wobei K_p die Anzahl der vorhergesagten Zeitschritte bezeichnet. Die zugehörige numerische Lösung und Implementierung werden im Anschluss diskutiert.

[0081] Der zweite Teil des Kapitels befasst sich mit der Planung der Trajektorien y_l^*, $\dot{y}_l^*$ und $\ddot{y}_l^*$ zum Verfahren der Last. Diese werden direkt aus dem Handhebelsignal des Kranfahrers W_{hh} generiert. Die Berechnung erfolgt durch eine Aufschaltung des maximal zulässigen Rucks.

1.1 Referenztralektorien für die Kompensation

[0082] Bei der Trajektorienplanung für die Kompensationsbewegung der Hubwinde sollen aus den vorhergesagten Vertikalpositionen und -geschwindigkeiten des Seilaufhängepunkts unter Beachtung der gültigen Antriebsbeschränkungen hinreichend glatte Trajektorien generiert werden. Diese Aufgabe wird nachfolgend als ein beschränktes Optimierungsproblem aufgefasst, welches in jedem Zeitschritt online zu lösen ist. Daher ähnelt die Herangehensweise dem Entwurf einer modellprädiktiven Regelung, allerdings im Sinne einer modellprädiktiven Trajektoriengenerierung.

[0083] Als Referenzen bzw. Sollwerte für die Optimierung dienen die zum Zeitpunkt t_k über einen kompletten Zeithorizont mit K_p Zeitschritten vorhergesagten Vertikalpositionen und -geschwindigkeiten des Seilaufhängepunkts

$$\tilde{\mathbf{z}}_a^h = \left[\tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,1}) \quad \dots \quad \tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,K_p})\right]^T \text{und } \dot{\tilde{\mathbf{z}}}_a^h = \left[\dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,1}) \quad \dots \quad \dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,K_p})\right]^T,$$

welche mit der entsprechenden Prädiktionszeit, z.B. mit Hilfe des in der DE 10 2008 024 513 beschriebenen Algorithmus, berechnet werden.

[0084] Unter Beachtung der durch k_l, v_{max} und a_{max} gültigen Beschränkungen lässt sich daraufhin eine optimale Zeitfolge für die Kompensationsbewegung bestimmen.

[0085] Allerdings wird analog zur modellprädiktiven Regelung nur der erste Wert der dadurch berechneten Trajektorie für die anschließende Regelung verwendet. Im nächsten Zeitschritt wird die Optimierung mit einer aktualisierten und dadurch genaueren Vorhersage der Vertikalposition und -geschwindigkeit des Seilaufhängepunkts wiederholt.

[0086] Der Vorteil der modellprädiktiven Trajektoriengenerierung mit nachgeschalteter Regelung gegenüber einer klassischen modellprädiktiven Regelung besteht zum Einen darin, dass sich der Regelungsteil und die damit verbundene Stabilisierung mit einer im Vergleich zur Trajektoriengenerierung höheren Abtastzeit berechnen lassen. Daher kann man die rechenzeitintensive Optimierung in einen langsameren Task verlagern.

[0087] Zum Anderen lässt sich bei diesem Konzept eine Notfallfunktion, für den Fall dass die Optimierung keine gültige Lösung findet, unabhängig von der Regelung realisieren. Sie besteht aus einer vereinfachten Trajektorienplanung, worauf die Regelung in einer solchen Notsituation zurückgreift und weiterhin die Winde ansteuert.

1.1.1 Systemmodell für die Planung der Kompensationsbewegung

[0088] Um die Anforderungen an die Stetigkeit der Referenztrajektorien für die Kompensationsbewegung zu erfüllen, darf frühestens deren dritte Ableitung $\dddot{y}_a^*$ als sprungfähig erachtet werden. Allerdings sind bei der Kompensationsbewegung im Hinblick auf die Windenlebensdauer Sprünge im Ruck zu vermeiden, wodurch erst die vierte Ableitung $y_a^{*(4)}$ als sprungfähig betrachtet werden kann.

[0089] Somit ist der Ruck $\dddot{y}_a^*$ mindestens stetig zu planen und die Trajektoriengenerierung für die Kompensationsbewegung erfolgt anhand der in Fig. 2 veranschaulichten Integratorkette vierter Ordnung. Diese dient bei der Optimierung als Systemmodell und lässt sich im Zustandsraum als

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_a &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_a} \mathbf{x}_a + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_a} u_a, \quad \mathbf{x}_a(0) = \mathbf{x}_{a,0}, \\ \mathbf{y}_a &= \mathbf{x}_a \end{aligned} \tag{1.1}$$

ausdrücken. Hier beinhaltet der Ausgang $\mathbf{y}_a = \left[y_a^*, \dot{y}_y^*, \ddot{y}_a^*, \dddot{y}_a^*\right]^T$ die geplanten Trajektorien für die Kompensationsbewegung. Zur Formulierung des Optimalsteuerungsproblems und in Hinblick auf die spätere Implementierung wird dieses zeitkontinuierliche Modell zunächst auf dem Gitter

$$\tau_0 < \tau_1 < \ldots < \tau_{K_p-1} < \tau_{K_p} \tag{1.2}$$

diskretisiert, wobei K_p die Anzahl der Prädiktionsschritte für die Vorhersage der Vertikalbewegung des Seilaufhängepunkts darstellt. Um die diskrete Zeitdarstellung bei der Trajektoriengenerierung von der diskreten Systemzeit t_k zu unterscheiden, wird sie mit $\tau_k = k\Delta\tau$ bezeichnet, wobei k=0, ···, k_p und $\Delta\tau$ das für die Trajektoriengenerierung verwendete Diskretisierungsintervall des Horizonts K_p ist.

[0090] Fig. 3 verdeutlicht, dass das gewählte Gitter nichtäquidistant ist, womit die Anzahl der notwendigen Stützstellen auf dem Horizont reduziert wird. Dadurch ist es möglich, die Dimension des zu lösenden Optimalsteuerungsproblems klein zu halten. Der Einfluss der gröberen Diskretisierung gegen Ende des Horizonts hat keine nachteiligen Auswirkungen auf die geplante Trajektorie, da die Vorhersage der Vertikalposition und -geschwindigkeit gegen Ende des Prädiktionshorizonts ungenauer ist.

[0091] Die für dieses Gitter gültige zeitdiskrete Systemdarstellung lässt sich anhand der analytischen Lösung

$$\mathbf{x}_a(t) = \mathrm{e}^{\mathbf{A}_a t}\mathbf{x}_a(0) + \int_0^t \mathrm{e}^{\mathbf{A}_a(t-\tau)}\mathbf{B}_a u_a(\tau)d\tau \tag{1.3}$$

exakt berechnen. Für die Integratorkette aus Fig. 2 folgt sie zu

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_a(\tau_{k+1}) &= \begin{bmatrix} 1 & \Delta\tau_k & \frac{\Delta\tau_k^2}{2} & \frac{\Delta\tau_k^3}{6} \\ 0 & 1 & \Delta\tau_k & \frac{\Delta\tau_k^2}{2} \\ 0 & 0 & 1 & \Delta\tau_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta\tau_k^4}{24} \\ \frac{\Delta\tau_k^3}{6} \\ \frac{\Delta\tau_k^2}{2} \\ \Delta\tau_k \end{bmatrix} u_a(\tau_k), \qquad \mathbf{x}_a(0) = \mathbf{x}_{a,0}, \\ \mathbf{y}_a(\tau_k) &= \mathbf{x}_a(\tau_k), \qquad\qquad k = 0, \ldots, K_p - 1, \end{aligned} \tag{1.4}$$

wobei $\Delta\tau_k = \tau_{k+1} - \tau_k$ die für den jeweiligen Zeitschritt gültige Diskretisierungsschrittweite beschreibt.

1.1.2 Formulierung und Lösung des Optimalsteuerungsproblems

[0092] Durch Lösen des Optimalsteuerungsproblems soll eine Trajektorie geplant werden, welche der vorhergesagten Vertikalbewegung des Seilaufhängepunkts möglichst nahe folgt und gleichzeitig den gegebenen Beschränkungen genügt.

[0093] Um diese Anforderung zu erfüllen, lautet die Gütefunktion wie folgt:

$$J = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{K_p}\left\{\left[\mathbf{y}_a(\tau_k) - \mathbf{w}_a(\tau_k)\right]^T \mathbf{Q}_w(\tau_k)\left[\mathbf{y}_a(\tau_k) - \mathbf{w}_a(\tau_k)\right] + u_a(\tau_{k-1}) r_u u_a(\tau_{k-1})\right\} \tag{1.5}$$

wobei $\mathbf{w}_a(\tau_k)$ die zum jeweiligen Zeitschritt gültige Referenz bezeichnet. Da hierfür nur die vorhergesagte Position $\tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,k})$ und Geschwindigkeit $\dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,k})$ des Seilaufhängepunkts zur Verfügung stehen, werden die zugehörige Beschleunigung und der Ruck zu Null gesetzt. Der Einfluss dieser inkonsistenten Vorgabe lässt sich allerdings durch eine entsprechende Gewichtung der Beschleunigungs- und Ruckabweichung klein halten. Somit gilt:

$$\mathbf{w}_a(\tau_k) = \left[\dot{z}_a^h(t_k + T_{p,k}) \quad \ddot{z}_a^h(t_k + T_{p,k}) \quad 0 \quad 0\right]^T, \quad k = 1, \ldots, K_p. \tag{1.6}$$

Über die positiv semidefinite Diagonalmatrix

$$\mathbf{Q}_w(\tau_k) = \mathrm{diag}\left(q_{w,1}(\tau_k), q_{w,2}(\tau_k), q_{w,3}, q_{w,4}\right), \quad k = 1, \ldots, K_p \tag{1.7}$$

werden Abweichungen von der Referenz in der Gütefunktion gewichtet. Der skalare Faktor r_u bewertet den Stellaufwand. Während r_u, $q_{w,3}$ und $q_{w,4}$ über den gesamten Prädiktionshorizont konstant sind, werden $q_{w,1}$ und $q_{w,2}$ in Abhängigkeit vom Zeitschritt τ_k gewählt. Dadurch lassen sich Referenzwerte am Anfang des Prädiktionshorizonts stärker gewichten als diejenigen am Ende. Mithin kann man die mit steigender Prognosezeit nachlassende Genauigkeit der Vertikalbewegungsprognose in der Gütefunktion abbilden. Wegen des Nichtvorhandenseins der Referenzen für die Beschleunigung und den Ruck bestrafen die Gewichte $q_{w,3}$ und $q_{w,4}$ nur Abweichungen von Null, weshalb sie kleiner als die Gewichte für die Position $q_{w,1}(\tau_k)$ und Geschwindigkeit $q_{w,2}(\tau_k)$ gewählt werden.

[0094] Die zugehörigen Beschränkungen für das Optimalsteuerungsproblem folgen aus der verfügbaren Leistung des Antriebs und dem aktuell gewählten Gewichtungsfaktor k_l (vgl. Fig. 1). Demnach gilt für die Zustände des Systemmodells aus (1.4):

$$\begin{aligned} -\delta_a(\tau_k)(1-k_l)v_{\max} \le x_{a,2}(\tau_k) \le \delta_a(\tau_k)(1-k_l)v_{\max}, \\ -\delta_a(\tau_k)(1-k_l)a_{\max} \le x_{a,3}(\tau_k) \le \delta_a(\tau_k)(1-k_l)a_{\max}, \quad k = 1, \ldots, K_p, \\ -\delta_a(\tau_k)j_{\max} \le x_{a,4}(\tau_k) \le \delta_a(\tau_k)j_{\max} \end{aligned} \tag{1.8}$$

und für den Eingang:

$$-\delta_a(\tau_k)\frac{d}{dt}j_{\max} \le u_a(\tau_k) \le \delta_a(\tau_k)\frac{d}{dt}j_{\max}, \quad k = 0, \ldots, K_p - 1. \tag{1.9}$$

Hier stellt $\delta_a(\tau_k)$ einen Reduktionsfaktor dar, der so gewählt wird, dass die jeweilige Beschränkung am Ende des Horizonts 95% derjenigen am Anfang des Horizonts beträgt. Für die dazwischenliegenden Zeitschritte folgt $\delta_a(\tau_k)$ aus linearer Interpolation. Die Reduktion der Beschränkungen entlang des Horizonts erhöht die Robustheit des Verfahrens in Bezug auf die Existenz zulässiger Lösungen.

[0095] Während die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbeschränkungen sich im Betrieb ändern können, sind die Beschränkungen des Rucks j_{max} und der Ableitung des Rucks $\frac{d}{dt}j_{\max}$ konstant. Um die Lebensdauer der Hubwinde und des gesamten Krans zu erhöhen, werden sie in Hinblick auf eine maximal zulässige Schockbelastung gewählt. Für den Positionszustand gelten keine Beschränkungen.

[0096] Da die maximale Geschwindigkeit v_{max} und Beschleunigung a_{max} sowie der Gewichtungsfaktor der Leistung k_l im Betrieb extern bestimmt sind, ändern sich zwangsläufig auch die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbeschränkungen für das Optimalsteuerungsproblem. Die damit verbundenen zeitvarianten Beschränkungen berücksichtigt das vorgestellte Konzept folgendermaßen: Sobald sich eine Beschränkung ändert, wird der aktualisierte Wert zuerst nur am Ende des Prädiktionshorizonts für den Zeitschritt τ_{K_p} einbezogen. Anschließend schiebt man ihn mit fortschreitender Zeit an den Anfang des Prädiktionshorizonts.

[0097] Fig. 4 verdeutlicht dieses Vorgehen anhand der Geschwindigkeitsbeschränkung. Bei der Reduzierung einer Beschränkung ist zusätzlich darauf zu achten, dass sie zu ihrer maximal zulässigen Ableitung passt. Dies bedeutet, dass beispielsweise die Geschwindigkeitsbeschränkung $(1-k_l)v_{max}$ maximal so schnell reduziert werden darf, wie es die aktuelle Beschleunigungsbeschränkung $(1-k_l)a_{max}$ erlaubt. Wegen des Durchschiebens der aktualisierten Beschränkungen existiert für eine in den Beschränkungen liegende Anfangsbedingung $x_a(\tau_0)$ immer eine Lösung, die wiederum nicht gegen die aktualisierten Beschränkungen verstößt. Allerdings dauert es den kompletten Prädiktionshorizont bis

sich eine geänderte Beschränkung endgültig auf die geplanten Trajektorien am Anfang des Horizonts auswirkt.

[0098] Somit ist das Optimalsteuerungsproblem durch die zu minimierende quadratische Gütefunktion (1.5), das Systemmodell (1.4) und die Ungleichungsbeschränkungen aus (1.8) und (1.9) in Form eines linear-quadratischen Optimierungsproblems (QP-Problem für **Q**uadratic **P**rogramming **P**roblem) vollständig gegeben. Bei erstmaliger Ausführung der Optimierung wird die Anfangsbedingung zu $x_a(\tau_0) = [0,0,0,0]^T$ gewählt. Anschließend verwendet man den im letzten Optimierungsschritt für den Zeitschritt τ_1 berechneten Wert $x_a(\tau_1)$ als Anfangsbedingung.

[0099] Die Berechnung der eigentlichen Lösung des QP-Problems erfolgt in jedem Zeitschritt über ein numerisches Verfahren, das man als QP-Solver bezeichnet.

[0100] Infolge des Rechenaufwands für die Optimierung ist die Abtastzeit für die Trajektorienplanung der Kompensationsbewegung größer als die Diskretisierungszeit aller restlichen Komponenten der aktiven Seegangskompensation; somit gilt $\Delta\tau > \Delta t$.

[0101] Damit die Referenztrajektorien allerdings für die Regelung im schnelleren Takt zur Verfügung stehen, findet die Simulation der Integratorkette aus Fig. 2 außerhalb der Optimierung mit der schnelleren Abtastzeit Δt statt. Sobald neue Werte aus der Optimierung vorliegen, werden die Zustände $x_a(\tau_0)$ als Anfangsbedingung für die Simulation verwendet und die Stellgröße am Anfang des Prädiktionshorizonts $u_a(\tau_0)$ als konstanter Eingang auf die Integratorkette geschrieben.

1.2 Referenztrajektorien für das Verfahren der Last

[0102] Analog zur Kompensationsbewegung sind für die überlagerte Handhebelsteuerung zweimal stetig differenzierbare Referenztrajektorien notwendig (vgl. Fig. 1). Da bei diesen durch den Kranfahrer vorgebbaren Bewegungen im Normalfall keine schnellen Richtungswechsel für die Winde zu erwarten sind, hat sich die Mindestanforderung einer stetig geplanten Beschleunigung $\ddot{y}_l^*$ auch in Bezug auf die Lebensdauer der Winde als ausreichend herausgestellt. Somit lässt sich im Gegensatz zu den für die Kompensationsbewegung geplanten Referenztrajektorien schon die dritte Ableitung $\dddot{y}_l^*$, welche dem Ruck entspricht, als sprungfähig erachten.

[0103] Wie Fig. 5 zeigt, dient sie gleichzeitig als Eingang einer Integratorkette dritter Ordnung. Neben den Anforderungen an die Stetigkeit müssen die geplanten Trajektorien auch die aktuell gültigen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbeschränkungen erfüllen, welche sich für die Handhebelsteuerung zu $k_l v_{max}$ und $k_l a_{max}$ ergeben.

[0104] Das Handhebelsignal des Kranfahrers $-100 \leq w_{hh} \leq 100$ wird als relative Geschwindigkeitsvorgabe in Bezug auf die aktuell maximal zulässige Geschwindigkeit $k_l v_{max}$ interpretiert. Somit ergibt sich die durch den Handhebel vorgegebene Sollgeschwindigkeit nach Fig. 6 zu

$$v_{\mathrm{hh}}^* = k_l v_{\max} \frac{w_{\mathrm{hh}}}{100}. \qquad (1.10)$$

[0105] Wie daraus hervorgeht hängt die aktuell durch den Handhebel vorgegebene Sollgeschwindigkeit von der Handhebelstellung W_{hh}, dem veränderlichen Gewichtungsfaktor k_l und der aktuellen maximal zulässigen Windengeschwindigkeit V_{max} ab.

[0106] Die Aufgabe der Trajektorienplanung für die Handhebelsteuerung lässt sich nun wie folgt angeben: Aus der durch den Handhebel vorgegebenen Sollgeschwindigkeit ist ein stetig differenzierbarer Geschwindigkeitsverlauf zu generieren, sodass die Beschleunigung einen stetigen Verlauf besitzt. Als Verfahren für diese Aufgabenstellung bietet sich eine sogenannte Ruckaufschaltung an.

[0107] Ihr Grundgedanke besagt, dass der maximal zulässige Ruck j_{max} in einer ersten Phase so lange auf den Eingang der Integratorkette einwirkt, bis die maximal zulässige Beschleunigung erreicht ist. In der zweiten Phase wird die Geschwindigkeit mit konstanter Beschleunigung erhöht; und in der letzten Phase schaltet man den maximal zulässigen negativen Ruck so auf, dass die gewünschte Endgeschwindigkeit erreicht wird.

[0108] Daher sind bei der Ruckaufschaltung lediglich die Schaltzeitpunkte zwischen den einzelnen Phasen zu bestimmen. Fig .7 stellt einen beispielhaften Verlauf des Rucks für einen Geschwindigkeitswechsel zusammen mit den Schaltzeitpunkten dar. Dabei bezeichnet $T_{l,0}$ den Zeitpunkt, an dem ein Umplanen stattfindet. Die Zeitpunkte $T_{l,1}$, $T_{l,2}$ und $T_{l,3}$ verweisen jeweils auf die berechneten Schaltzeitpunkte zwischen den einzelnen Phasen. Ihre Berechnung skizziert der folgende Absatz.

[0109] Sobald für die Handhebelsteuerung eine neue Situation eintritt, vollzieht sich ein Umplanen der generierten Trajektorien. Eine neue Situation tritt ein, sobald sich die Sollgeschwindigkeit v_{hh}^* oder die aktuell gültige maximale Beschleunigung für die Handhebelsteuerung $k_l a_{max}$ ändert. Die Sollgeschwindigkeit kann sich aufgrund einer neuen Handhebelstellung W_{hh} oder durch eine neue Vorgabe von k_l bzw. V_{max} ändern (vgl. Fig. 6). Analog dazu ist eine Variation der maximal gültigen Beschleunigung durch k_l oder a_{max} möglich.

[0110] Bei einem Umplanen der Trajektorien wird zunächst aus der aktuell geplanten Geschwindigkeit $\dot{y}_l^*(T_{l,0})$ und der entsprechenden Beschleunigung $\ddot{y}_l^*(T_{l,0})$ diejenige Geschwindigkeit berechnet, welche sich bei einer Reduzierung der Beschleunigung auf Null ergibt:

$$\tilde{v} = \dot{y}_l^*(T_{l,0}) + \Delta\tilde{T}_1 \ddot{y}_l^*(T_{l,0}) + \frac{1}{2}\Delta\tilde{T}_1^2 \tilde{u}_{l,1}, \tag{1.11}$$

wobei die minimal notwendige Zeit durch

$$\Delta\tilde{T}_1 = -\frac{\ddot{y}_l^*}{\tilde{u}_{l,1}}, \quad \tilde{u}_{l,1} \neq 0 \tag{1.12}$$

gegeben ist und $\tilde{u}_{l,1}$ den Eingang der Integratorkette benennt, also den aufgeschalteten Ruck (vgl. Fig. 5). Er ergibt sich in Abhängigkeit von der aktuell geplanten Beschleunigung $\ddot{y}_l^*(T_{l,0})$ zu

$$\tilde{u}_{l,1} = \begin{cases} j_{\max}, & \text{für } \ddot{y}_l^* < 0 \\ -j_{\max}, & \text{für } \ddot{y}_l^* > 0 \\ 0, & \text{für } \ddot{y}_l^* = 0 \end{cases}. \tag{1.13}$$

[0111] Abhängig von der theoretisch berechneten Geschwindigkeit und der gewünschten Sollgeschwindigkeit lässt sich nun der Verlauf des Eingangs angeben. Falls $v_{hh}^* > \tilde{v}$ ist, erreicht $\tilde{v}$ den gewünschten Wert v_{hh}^* nicht und die Beschleunigung kann weiter erhöht werden. Falls jedoch $v_{hh}^* < \tilde{v}$ gilt, ist $\tilde{v}$ zu schnell und die Beschleunigung ist sofort zu reduzieren.

[0112] Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Schaltfolgen des Rucks für die drei Phasen ableiten

$$\mathbf{u}_l = \begin{cases} \begin{bmatrix} j_{\max} & 0 & -j_{\max} \end{bmatrix}, & \text{für } \tilde{v} \leq v_{\mathrm{hh}}^* \\ \begin{bmatrix} -j_{\max} & 0 & j_{\max} \end{bmatrix}, & \text{für } \tilde{v} > v_{\mathrm{hh}}^* \end{cases} \tag{1.14}$$

mit $u_l = [u_{l,1}, u_{l,2}, u_{l,3}]$ und dem in der jeweiligen Phase aufgeschalteten Eingangssignal $u_{l,i}$. Die Dauer einer Phase ergibt

sich zu $\Delta T_i = T_{l,i} - T_{l,i-1}$ mit $i = 1, 2, 3$. Demnach lauten die geplante Geschwindigkeit und Beschleunigung am Ende der ersten Phase:

$$\dot{y}_l^*(T_{l,1}) = \dot{y}_l^*(T_{l,0}) + \Delta T_1 \ddot{y}_l^*(T_{l,0}) + \frac{1}{2}\Delta T_1^2 u_{l,1}, \tag{1.15}$$

$$\ddot{y}_l^*(T_{l,1}) = \ddot{y}_l^*(T_{l,0}) + \Delta T_1 u_{l,1} \tag{1.16}$$

und nach der zweiten Phase:

$$\dot{y}_l^*(T_{l,2}) = \dot{y}_l^*(T_{l,1}) + \Delta T_2 \ddot{y}_l^*(T_{l,1}), \tag{1.17}$$

$$\ddot{y}_l^*(T_{l,2}) = \ddot{y}_l^*(T_{l,1}), \tag{1.18}$$

wobei $u_{l,2} = 0$ angenommen wurde. Nach der dritten Phase folgt schließlich:

$$\dot{y}_l^*(T_{l,3}) = \dot{y}_l^*(T_{l,2}) + \Delta T_3 \ddot{y}_l^*(T_{l,2}) + \frac{1}{2}\Delta T_3^2 u_{l,3}, \tag{1.19}$$

$$\ddot{y}_l^*(T_{l,3}) = \ddot{y}_l^*(T_{l,2}) + \Delta T_3 u_{l,3}. \tag{1.20}$$

[0113] Zur genauen Berechnung der Schaltzeitpunkte $T_{l,i}$ wird zunächst die Beschleunigungsbeschränkung vernachlässigt, wodurch $\Delta T_2 = 0$ gilt. Aufgrund dieser Vereinfachung lassen sich die Längen der beiden restlichen Zeitintervalle wie folgt angeben:

$$\Delta T_1 = \frac{\tilde{a} - \ddot{y}_l^*(T_{l,0})}{u_{l,1}}, \tag{1.21}$$

$$\Delta T_3 = \frac{0 - \tilde{a}}{u_{l,3}}, \tag{1.22}$$

wobei $\tilde{a}$ für die maximal erreichte Beschleunigung steht. Durch Einsetzen von (1.21) und (1.22) in (1.15), (1.16) und (1.19) entsteht ein Gleichungssystem, das sich nach $\tilde{a}$ auflösen lässt. Unter Beachtung von $\dot{y}_l^*(T_{l,3}) = v_{hl}^*$ ergibt sich letztendlich:

$$\tilde{a} = \pm\sqrt{\frac{u_{l,3}\left[2\dot{y}_l^*(T_{l,0})u_{l,1} - \ddot{y}_l^*(T_{l,0})^2 - 2v_{\mathrm{hh}}^* u_{l,1}\right]}{u_{l,1} - u_{l,3}}}. \tag{1.23}$$

[0114] Das Vorzeichen von $\tilde{a}$ folgt aus der Bedingung, dass ΔT_1 und ΔT_3 in (1.21) bzw. (1.22) positiv sein müssen.

[0115] In einem zweiten Schritt ermittelt sich aus $\tilde{a}$ und der maximal zulässigen Beschleunigung $k_l a_{max}$ die eigentliche Maximalbeschleunigung:

$$\bar{a} = \ddot{y}_l^*(T_{l,1}) = \ddot{y}_l^*(T_{l,2}) = \min\{k_l a_{\max}, \max\{-k_l a_{\max}, \tilde{a}\}\}. \tag{1.24}$$

[0116] Mit ihr lassen sich letztendlich die wirklich auftretenden Zeitintervalle ΔT_1 und ΔT_3 berechnen. Sie resultieren aus (1.21) und (1.22) mit $\tilde{a}=\bar{a}$. Das noch unbekannte Zeitintervall ΔT_2 bestimmt sich nun aus (1.17) und (1.19) mit ΔT_1 und ΔT_3 aus (1.21) und (1.22) zu

$$\Delta T_2 = \frac{2v_{\mathrm{hh}}^* u_{l,3} + \bar{a}^2 - 2\dot{y}_l^*(T_{l,1})u_{l,3}}{2\bar{a}u_{l,3}}, \tag{1.25}$$

wobei $\dot{y}_l^*(T_{l,1})$ aus (1.15) folgt. Die Schaltzeitpunkte lassen sich direkt aus den Zeitintervallen ablesen:

$$T_{l,i} = T_{l,i-1} + \Delta T_i, \quad i = 1,2,3. \tag{1.26}$$

[0117] Die zu planenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe $\dot{y}_l^*$ und $\ddot{y}_l^*$ kann man mit den einzelnen Schaltzeitpunkten analytisch berechnen. Hierbei ist zu erwähnen, dass die durch die Schaltzeitpunkte geplanten Trajektorien häufig nicht vollständig abgefahren werden, da vor Erreichen des Schaltzeitpunkts $T_{l,3}$ eine neue Situation eintritt, dadurch ein Umplanen stattfindet und neue Schaltzeitpunkte berechnet werden. Wie bereits erwähnt tritt eine neue Situation durch eine Änderung von W_{hh}, V_{max}, a_{max} oder k_l ein.

[0118] Fig. 8 zeigt eine mittels des vorgestellten Verfahrens beispielhaft generierte Trajektorie. Der Verlauf der Trajektorien beinhaltet beide Fälle, welche aufgrund von (1.24) eintreten können. Im ersten Fall wird die maximal zulässige Beschleunigung zum Zeitpunkt t = 1 s erreicht und es folgt eine Phase mit konstanter Beschleunigung. Der zweite Fall tritt zum Zeitpunkt t = 3,5s ein. Hier wird die maximal zulässige Beschleunigung aufgrund der Handhebelstellung nicht vollständig erreicht. Die Folge ist, dass der erste und zweite Schaltzeitpunkt zusammenfallen und ΔT_2 = 0 gilt. Der zugehörige Positionsverlauf berechnet sich nach Fig. 5 durch Integration des Geschwindigkeitsverlaufs, wobei die Position bei Systemstart durch die aktuell von der Hubwinde abgewickelte Seillänge initialisiert wird.

2 Ansteuerungskonzept für die Hubwinde

[0119] Prinzipiell besteht die Ansteuerung aus zwei unterschiedlichen Betriebsmodi: der aktiven Seegangskompensation zur Entkopplung der vertikalen Lastbewegung von der Schiffsbewegung bei frei hängender Last und der Konstantspannungsregelung zur Vermeidung von Schlaffseil, sobald die Last auf dem Meeresboden abgesetzt ist. Während eines Tiefseehubs ist zunächst die Seegangskompensation aktiv. Anhand einer Detektion des Absetzvorgangs wird automatisch auf die Konstantspannungsregelung umgeschaltet. Fig. 9 veranschaulicht das Gesamtkonzept mit den zugehörigen Führungs- und Regelgrößen.

[0120] Jeder der beiden unterschiedlichen Betriebsmodi könnte jedoch auch jeweils ohne den anderen Betriebsmodus implementiert werden. Weiterhin kann ein Konstantspannungsmodus, wie er im folgenden beschrieben wird, auch un-

abhängig vom Einsatz des Kranes auf einem Schiff und unabhängig von einer aktiven Seegangskompensation eingesetzt werden.

[0121] Durch die aktive Seegangskompensation soll die Hubwinde so angesteuert werden, dass die Windenbewegung die Vertikalbewegung des Seilaufhängepunkts z_a^{lh} ausgleicht und der Kranfahrer die Last mit Hilfe des Handhebels im als inertial betrachteten h-Koordinatensystem verfährt. Damit die Ansteuerung das geforderte prädiktive Verhalten zur Minimierung des Kompensationsfehlers aufweist, wird sie durch einen Vorsteuerungs- und Stabilisierungsteil in Form einer Zwei-Freiheitsgrade-Struktur umgesetzt. Die Vorsteuerung berechnet sich aus einer differentiellen Parametrierung mit Hilfe des flachen Ausgangs der Windendynamik und ergibt sich aus den geplanten Trajektorien zum Verfahren der Last y_l^*, $\dot{y}_l^*$ und $\ddot{y}_l^*$ sowie den negativen Trajektorien für die Kompensationsbewegung $-y_a^*$, $-\dot{y}_a^*$ und $-\ddot{y}_a^*$ (vgl. Fig. 9). Die daraus resultierenden Solltrajektorien für den Systemausgang der Antriebsdynamik bzw. der Windendynamik werden mit y_h^*, $\dot{y}_h^*$ und $\ddot{y}_h^*$ bezeichnet. Sie stellen die Sollposition, -geschwindigkeit und -beschleunigung für die Windenbewegung und dadurch für das Auf- und Abwickeln des Seils dar.

[0122] Während der Konstantspannungsphase soll die Seilkraft an der Last F_{sl} auf einen konstanten Betrag geregelt werden, um Schlaffseil zu vermeiden. Daher wird in diesem Betriebsmodus der Handhebel deaktiviert, und die aus dem Handhebelsignal geplanten Trajektorien werden nicht mehr aufgeschaltet. Die Ansteuerung der Winde erfolgt wiederum durch eine Zwei-Freiheitsgrade-Struktur mit Vorsteuerungs- und Stabilisierungsteil.

[0123] Die genaue Lastposition z_l und die Seilkraft an der Last $F_{s/}$ stehen für die Regelung nicht als Messgrößen zur Verfügung, da der Kranhaken aufgrund der langen Seillängen und großen Tiefen mit keinerlei Sensorik ausgestattet ist. Des Weiteren existiert keinerlei Information über Form und Art der angehängten Last. Deshalb sind die einzelnen lastspezifischen Parameter wie Lastmasse m_l, Koeffizient der hydrodynamischen Massenerhöhung C_a, Widerstandskoeffizient C_d und eingetauchtes Volumen ∇l, allgemein nicht bekannt, wodurch eine zuverlässige Schätzung der Lastposition in der Praxis nahezu unmöglich ist.

[0124] Mithin stehen als Messgrößen für die Regelung lediglich die abgewickelte Seillänge l_s und die zugehörige Geschwindigkeit i_s sowie die Kraft am Seilaufhängepunkt F_c zur Verfügung. Die Länge l_s ergibt sich indirekt aus dem mit einem Inkrementalgeber gemessenen Windenwinkel φ_h und dem von der Wicklungslage j_l abhängigen Windenradius $r_h(j_l)$. Die zugehörige Seilgeschwindigkeit i_s lässt sich durch numerische Differentiation mit geeigneter Tiefpassfilterung berechnen. Die am Seilaufhängepunkt angreifende Seilkraft F_c wird mit Hilfe einer Kraftmessachse erfasst.

2.1 Ansteuerung für die aktive Seegangskompensation

[0125] Fig. 10 verdeutlicht die Ansteuerung der Hubwinde für die aktive Seegangskompensation mit einem Blockschaltbild im Frequenzbereich. Wie darin ersichtlich, erfolgt nur eine Rückführung der Seillänge und -geschwindigkeit $y_h = l_s$ und $\dot{y}_h = i_s$ aus dem Teilsystem des Antriebs $G_h(s)$. Dadurch vollzieht sich die Kompensation der als Eingangsstörung auf das Seilsystem $G_{s,z}(s)$ wirkenden Vertikalbewegung des Seilaufhängepunkts $Z_a^{lh}(s)$ rein vorsteuernd; Seil- und Lastdynamik werden vernachlässigt. Zwar wird infolge einer nicht vollständigen Kompensation der Eingangsstörung oder einer Windenbewegung die Seileigendynamik angeregt, aber man kann in der Praxis davon ausgehen, dass die resultierende Lastbewegung im Wasser stark gedämpft ist und sehr schnell abklingt.

[0126] Die Übertragungsfunktion des Antriebssystems von der Stellgröße $U_h(s)$ auf die abgewickelte Seillänge $Y_h(s)$ lässt sich als IT_1-System approximieren und ergibt sich zu

$$G_h(s) = \frac{Y_h(s)}{U_h(s)} = \frac{K_h r_h(j_l)}{T_h s^2 + s} \qquad (2.1)$$

mit dem Windenradius $r_h(j_l)$. Da der Systemausgang $Y_h(s)$ gleichzeitig einen flachen Ausgang darstellt, folgt die invertierende Vorsteuerung F(s) zu

$$F(s) = \frac{U_{\mathrm{ff}}(s)}{Y_h^*(s)} = \frac{1}{G_h(s)} = \frac{T_h}{K_h r_h(j_l)} s^2 + \frac{1}{K_h r_h(j_l)} s \qquad (2.2)$$

und lässt sich im Zeitbereich in Form einer differentiellen Parametrierung als

$$u_{\mathrm{ff}}(t) = \frac{T_h}{K_h r_h(j_l)} \ddot{y}_h^*(t) + \frac{1}{K_h r_h(j_l)} \dot{y}_h^*(t) \qquad (2.3)$$

schreiben. (2.3) zeigt, dass die Referenztrajektorie für die Vorsteuerung mindestens zweimal stetig differenzierbar sein muss.

[0127] Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises, bestehend aus der Stabilisierung $K_a(s)$ und dem Windensystem $G_h(s)$, lässt sich aus Fig. 10 zu

$$G_{\mathrm{AHC}}(s) = \frac{K_a(s) G_h(s)}{1 + K_a(s) G_h(s)} \qquad (2.4)$$

ablesen. Unter Vernachlässigung der Kompensationsbewegung $Y_a^*(s)$ kann die Führungsgröße $Y_h^*(s)$ bei konstanter bzw. stationärer Handhebelauslenkung als rampenförmiges Signal angenähert werden, da in solch einem Fall eine konstante Sollgeschwindigkeit v_{hh}^* vorliegt. Zur Vermeidung einer stationären Regelabweichung bei einer derartigen Führungsgröße muss die offene Kette $K_a(s)G_h(s)$ deshalb I_2-Verhalten besitzen [9]. Dies lässt sich beispielsweise durch einen PID-Regler mit

$$K_a(s) = \frac{T_h}{K_h r_h(j_l)} \left(\frac{\kappa_{\mathrm{AHC},0}}{s} + \kappa_{\mathrm{AHC},1} + \kappa_{\mathrm{AHC},2} s \right), \quad \kappa_{\mathrm{AHC},i} > 0 \qquad (2.5)$$

erreichen. Demnach folgt für den geschlossenen Kreis:

$$G_{\mathrm{AHC}}(s) = \frac{\kappa_{\mathrm{AHC},0} + \kappa_{\mathrm{AHC},1} s + \kappa_{\mathrm{AHC},2} s^2}{s^3 + (\frac{1}{T_h} + \kappa_{\mathrm{AHC},2}) s^2 + \kappa_{\mathrm{AHC},1} s + \kappa_{\mathrm{AHC},0}}, \qquad (2.6)$$

wobei die genauen Werte von $\kappa_{AHC,i}$ in Abhängigkeit von der jeweiligen Zeitkonstante T_h gewählt werden.

2.2 Detektion des Absetzvorgangs

[0128] Sobald die Last auf den Meeresgrund trifft, soll von der aktiven Seegangskompensation in die Konstantspannungsregelung umgeschaltet werden. Hierfür ist eine Detektion des Absetzvorgangs notwendig (vgl. Fig. 9). Für sie und die anschließende Konstantspannungsregelung wird das Seil als einfaches Feder-Masse-Element approximiert. Somit berechnet sich die wirkende Kraft am Seilaufhängepunkt näherungsweise zu

$$F_c = k_c \Delta l_c, \tag{2.7}$$

wobei k_c und Δl_c die zur Elastizität des Seils äquivalente Federkonstante und die Auslenkung der Feder bezeichnen. Für letztere gilt:

$$\Delta l_c = \int_0^1 \varepsilon_s(\bar{s}, t) d\bar{s} = \bar{z}_{s,\mathrm{stat}}(1) - \bar{z}_{s,\mathrm{stat}}(0) - l_s = \frac{g l_s}{E_s A_s} \left(m_e + \frac{1}{2} \mu_s l_s \right). \tag{2.8}$$

[0129] Die äquivalente Federkonstante k_c lässt sich aus folgender stationärer Betrachtung bestimmen. Für eine mit der Masse m_f belastete Feder gilt im stationären Fall:

$$k_c \Delta l_c = m_f g. \tag{2.9}$$

[0130] Durch Umformen von (2.8) ergibt sich

$$\frac{E_s A_s}{l_s} \Delta l_c = \left(m_e + \frac{1}{2} \mu_s l_s \right) g. \tag{2.10}$$

[0131] Anhand eines Koeffizientenvergleichs zwischen (2.9) und (2.10) lässt sich die äquivalente Federkonstante als

$$k_c = \frac{E_s A_s}{l_s} \tag{2.11}$$

ablesen. Außerdem ist in (2.9) zu erkennen, dass die Auslenkung der Feder Δl_c im stationären Fall von der effektiven Lastmasse m_e und der halben Seilmasse $\frac{1}{2} \mu_s l_s$ beeinflusst wird. Dies liegt daran, dass bei einer Feder die angehängte Masse m_f als in einem Punkt konzentriert angenommen wird. Die Seilmasse ist jedoch über die Seillänge gleichmäßig verteilt und belastet daher die Feder nicht in vollem Umfang. Trotzdem fließt in die Kraftmessung am Seilaufhängepunkt die volle Gewichtskraft des Seils $\mu_s l_s g$ ein.

[0132] Mit dieser Approximation des Seilsystems lassen sich nun Bedingungen für die Detektion des Absetzvorgangs auf dem Meeresgrund ableiten. In Ruhe setzt sich die am Seilaufhängepunkt angreifende Kraft aus der Gewichtskraft des abgewickelten Seils $\mu_s l_s g$ und der effektiven Gewichtskraft der Lastmasse $m_e g$ zusammen. Daher ergibt sich die gemessene Kraft F_c bei einer auf dem Meeresboden befindlichen Last näherungsweise zu

$$F_c = (m_e + \mu_s l_s) g + \Delta F_c \tag{2.12}$$

mit

$$\Delta F_c = -k_c \Delta l_s, \tag{2.13}$$

wobei Δl_s das nach dem Auftreffen auf dem Meeresboden abgewickelte Seil bezeichnet. Aus (2.13) folgt, dass Δl_s proportional zur Änderung der gemessenen Kraft ist, da die Lastposition nach dem Aufsetzen konstant ist. Anhand von (2.12) und (2.13) lassen sich nun folgende Bedingungen für eine Detektion ableiten, die gleichzeitig erfüllt sein müssen:

- Die Abnahme der negativen Federkraft muss kleiner als ein Schwellwert sein:

$$\Delta F_c < \Delta \hat{F}_c. \tag{2.14}$$

- Die zeitliche Ableitung der Federkraft muss kleiner als ein Schwellwert sein:

$$\dot{F}_c < \dot{\hat{F}}_c. \tag{2.15}$$

- Der Kranfahrer muss die Last absenken. Diese Bedingung wird anhand der mit dem Handhebelsignal geplanten Trajektorie überprüft:

$$\dot{y}_l^* \geq 0. \tag{2.16}$$

- Zur Vermeidung einer Fehldetektion beim Eintauchen in das Wasser muss eine Mindestseillänge abgewickelt sein:

$$l_s > l_{s,\min}. \tag{2.17}$$

[0133] Die Abnahme der negativen Federkraft ΔF_c berechnet sich dabei jeweils in Bezug auf den letzten Hochpunkt $\overline{F}_c$ im gemessenen Kraftsignal F_c. Zur Unterdrückung von Messrauschen und hochfrequenten Störungen wird das Kraftsignal durch ein entsprechendes Tiefpassfilter vorverarbeitet.

[0134] Da die Bedingungen (2.14) und (2.15) gleichzeitig erfüllt sein müssen, wird eine Fehldetektion infolge einer dynamischen Seileigenschwingung ausgeschlossen: Als Resultat der dynamischen Seileigenschwingung oszilliert das Kraftsignal F_c, wodurch die Änderung der Federkraft ΔF_c in Bezug auf den letzten Hochpunkt $\overline{F}_c$ und die zeitliche Ableitung der Federkraft $\dot{F}_c$ eine verschobene Phase aufweisen. Folglich können bei geeigneter Wahl der Schwellwerte $\Delta\hat{F}_c$ und $\hat{F}_c$ im Fall einer dynamischen Seileigenschwingung beide Bedingungen nicht gleichzeitig erfüllt sein. Hierfür muss der statische Anteil der Seilkraft abfallen, wie es beim Eintauchen in das Wasser oder beim Absetzen auf den Meeresgrund geschieht. Eine Fehldetektion beim Eintauchen in das Wasser wird allerdings durch Bedingung (2.17) verhindert.

[0135] Der Schwellwert für die Änderung der Federkraft berechnet sich in Abhängigkeit vom letzten Hochpunkt im gemessenen Kraftsignal zu

$$\Delta \hat{F}_c = \min\left\{-\chi_1 \bar{F}_c, \Delta \hat{F}_{c,\max}\right\}, \tag{2.18}$$

wobei X_1 <1 und der Maximalwert $\Delta\hat{F}_{c,\max}$ experimentell bestimmt wurden. Der Schwellwert für die Ableitung des Kraftsignals $\hat{F}_c$ lässt sich aus der zeitlichen Ableitung von (2.7) und der maximal zulässigen Handhebelgeschwindigkeit $k_l v_{max}$ zu

$$\dot{\hat{F}}_c = \min\left\{-\chi_2 k_c k_l v_{\max}, \dot{\hat{F}}_{c,\max}\right\} \tag{2.19}$$

abschätzen. Die beiden Parameter χ_2 <1 und $\hat{F}_{c,max}$ wurden ebenfalls experimentell ermittelt.

[0136] Da bei der Konstantspannungsregelung statt der Positionsregelung eine Kraftregelung Anwendung findet, wird als Führungsgröße eine Sollkraft F_c^* in Abhängigkeit von der Summe aller an der Last angreifenden statischen Kräfte $F_{l,stat}$ vorgegeben. Dazu wird $F_{l,stat}$ in der Phase der Seegangskompensation unter Beachtung der bekannten Seilmasse $\mu_s l_s$ berechnet:

$$F_{l,\mathrm{stat}} = F_{c,\mathrm{stat}} - \mu_s l_s g. \tag{2.20}$$

[0137] Dabei bezeichnet $F_{c,stat}$ den statischen Kraftanteil der gemessenen Kraft am Seilaufhängepunkt F_c. Er stammt aus einer entsprechenden Tiefpassfilterung des gemessenen Kraftsignals. Die bei der Filterung entstehende Gruppenlaufzeit ist kein Problem, da lediglich der statische Kraftanteil von Interesse ist und eine Zeitverzögerung hierauf keinen signifikanten Einfluss hat. Aus der Summe aller an der Last angreifenden statischen Kräfte folgt die Sollkraft unter Berücksichtigung der zusätzlich auf den Seilaufhängepunkt wirkenden Gewichtskraft des Seils zu

$$F_c^* = p_s F_{l,\mathrm{stat}} + \mu_s l_s g, \tag{2.21}$$

wobei mit $0 < p_s < 1$ die resultierende Spannung im Seil durch den Kranfahrer vorgegeben wird. Zur Vermeidung eines Sollwertsprungs in der Führungsgröße erfolgt nach einer Detektion des Absetzvorgangs ein rampenförmiger Übergang von der aktuell bei der Detektion gemessenen Kraft zur eigentlichen Sollkraft F_c^*.

[0138] Zum Aufheben der Last vom Meeresgrund führt der Kranfahrer den Wechsel vom Konstantspannungsmodus in die aktive Seegangskompensation bei frei hängender Last manuell durch.

2.3 Ansteuerung für den Konstantspannungsmodus

[0139] Fig. 11 zeigt die umgesetzte Ansteuerung der Hubwinde im Konstantspannungsmodus in einem Blockschaltbild im Frequenzbereich. Im Gegensatz zu der in Fig. 10 veranschaulichten Regelungsstruktur wird hier der Ausgang des Seilsystems $F_c(s)$, d. h. die am Seilaufhängepunkt gemessene Kraft, anstelle vom Ausgang des Windensystems $Y_h(s)$ zurückgeführt. Die gemessene Kraft $F_c(s)$ setzt sich nach (2.12) aus der Kraftänderung $\Delta F_c(s)$ und der statischen Gewichtskraft $m_e g+\mu_s l_s g$, die im Bildbereich mit M(s) bezeichnet wird, zusammen. Für die eigentliche Regelung wird das Seilsystem wiederum als Feder-Masse-System approximiert.

[0140] Die Vorsteuerung F(s) der Zwei-Freiheitsgrade-Struktur ist identisch mit der für die aktive Seegangskompensation und durch (2.2) bzw. (2.3) gegeben. Allerdings wird im Konstantspannungsmodus das Handhebelsignal nicht aufgeschaltet, weswegen die Referenztrajektorie nur aus der negativen Sollgeschwindigkeit und -beschleunigung $-\dot{y}_a^*$ und $-\ddot{y}_a^*$ für die Kompensationsbewegung besteht. Der Vorsteuerungsanteil kompensiert zunächst wiederum die

Vertikalbewegung des Seilaufhängepunkts $Z_a^h(s)$. Jedoch erfolgt keine direkte Stabilisierung der Windenposition durch eine Rückführung von $Y_h(s)$. Dies erfolgt indirekt durch die Rückführung des gemessenen Kraftsignals.

[0141] Der gemessene Ausgang $F_c(s)$ ergibt sich aus Fig. 11 zu

$$F_c(s) = G_{\mathrm{CT},1}(s) \underbrace{\left[Y_a^*(s)F(s)G_h(s) + Z_a^h(s)\right]}_{E_a(s)} + G_{\mathrm{CT},2}(s)F_c^*(s) \tag{2.22}$$

mit den beiden Übertragungsfunktionen

$$G_{\mathrm{CT},1}(s) = \frac{G_{s,F}(s)}{1 + K_s(s)G_h(s)G_{s,F}(s)}, \tag{2.23}$$

$$G_{\mathrm{CT},2}(s) = \frac{K_s(s)G_h(s)G_{s,F}(s)}{1 + K_s(s)G_h(s)G_{s,F}(s)}, \tag{2.24}$$

wobei die Übertragungsfunktion des Seilsystems für eine am Boden stehende Last aus (2.12) folgt:

$$G_{s,F}(s) = -k_c. \tag{2.25}$$

[0142] Wie aus (2.22) hervorgeht, wird durch eine stabile Übertragungsfunktion $G_{CT,1}(S)$ der Kompensationsfehler $E_a(s)$ ausgeregelt und die Windenposition indirekt stabilisiert. Die Anforderung an den Regler $K_s(s)$ resultiert auch in diesem Fall aus dem erwarteten Führungssignal $F_c^*(s)$, welches nach einer Übergangsphase durch die konstante Sollkraft F_c^* aus (2.21) gegeben ist. Zur Vermeidung einer stationären Regelabweichung bei solch einer konstanten Führungsgröße muss die offene Kette $K_s(s)\,G_h(s)\,G_{s,F}(s)$ /- Verhalten besitzen. Da die Übertragungsfunktion der Winde $G_h(s)$ solch ein Verhalten schon implizit aufweist, lässt sich diese Anforderung mit einer P- Rückführung realisieren; somit gilt:

$$K_s(s) = -\frac{T_h}{K_h r_h(j_l)}\kappa_{\mathrm{CT}}, \quad \kappa_{\mathrm{CT}} > 0. \tag{2.26}$$

Patentansprüche

1. Kransteuerung für einen Kran, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist, mit einer aktiven Seegangskompensation, welche durch eine Ansteuerung des Hubwerks die Bewegung des Seilaufhängepunkts und/oder eines Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgleicht, **dadurch gekennzeichnet,**

dass die Seegangskompensation bei der Berechung der Ansteuerung des Hubwerkes mindestens eine Beschränkung des Hubwerks berücksichtigt.

2. Kransteuerung nach Anspruch 1, wobei die Seegangskompensation einen maximal zulässigen Ruck und/oder eine maximal zur Verfügung stehende Beschleunigung und/oder eine maximal zur Verfügung stehende Geschwindigkeit und/oder eine maximal zur Verfügung stehende Leistung berücksichtigt und/oder wobei die Kransteuerung eine Berechnungsfunktion aufweist, welche mindestens eine Beschränkung des Hubwerks berechnet, und insbesondere die maximal zur Verfügung stehende Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks und/oder Leistung berechnet, wobei die Berechnungsfunktion vorteilhafterweise die Länge des abgewickelten Seiles und/oder die Seilkraft und/oder die zum Antrieb des Hubwerks zur Verfügung stehende Leistung berücksichtigt.

3. Kransteuerung nach Anspruch 1 oder 2, wobei der Antrieb des Hubwerks mit einem Energiespeicher in Verbindung steht.

4. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einem Bahnplanungsmodul, welches anhand der prognostizierten Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes und unter Berücksichtigung der Beschränkung des Hubwerks eine Trajektorie bestimmt, wobei das Bahnplanungsmodul vorteilhafterweise eine Optimierungsfunktion aufweist, welche anhand der prognostizierten Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes und unter Berücksichtigung der Beschränkungen des Hubwerks eine Trajektorie bestimmt, welche die Restbewegung der Last aufgrund der Bewegung des Seilaufhängepunkts und/oder eines Lastabsetzpunktes minimiert.

5. Kransteuerung für einen Kran, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist, insbesondere Kransteuerung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, mit
einer aktiven Seegangskompensation, welche durch eine Ansteuerung des Hubwerks die Bewegung des Seilaufhängepunkts und/oder eines Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgleicht,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Seegangskompensation ein Bahnplanungsmodul aufweist, welches anhand einer prognostizierten Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes eine Trajektorie der Position und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks berechnet, welche in einen Sollwert für eine nachgelagerte Regelung des Hubwerks eingeht.

6. Kransteuerung nach Anspruch 5, wobei die Regelung des Hubwerks vorteilhafterweise Messwerte zur Position und/oder Geschwindigkeit der Hubwinde zurückführt und/oder die Dynamik des Antriebes der Hubwinde durch eine Vorsteuerung berücksichtigt.

7. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche mit einer Bedienersteuerung, welche das Hubwerk anhand von Vorgaben des Bedieners ansteuert, wobei die Steuerung vorteilhafterweise zwei getrennte Bahnplanungsmodule aufweist, über welche getrennt voneinander Trajektorien für die Seegangskompensation und für die Bedienersteuerung berechnet werden, wobei weiter vorteilhafterweise die durch die zwei getrennten Bahnplanungsmodule vorgegebenen Trajektorien summiert werden und als Sollwerte für die Steuerung und/oder Regelung des Hubwerks dienen.

8. Kransteuerung nach Anspruch 7, wobei die Aufteilung mindestens einer kinematisch beschränkten Größe zwischen Seegangskompensation und Bedienersteuerung einstellbar ist, wobei vorteilhafterweise die Einstellung über mindestens einen Gewichtungsfaktor erfolgt, über welchen die maximal zur Verfügung stehende Leistung und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks zwischen der Seegangskompensation und der Bedienersteuerung aufgeteilt wird.

9. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Optimierungsfunktion der Seegangskompensation eine Solltrajektorie bestimmt, welche in die Steuerung und/oder Regelung des Hubwerkes eingeht,
wobei die Optimierung bei jedem Zeitschritt auf Grundlage einer aktualisierten Prognose der Bewegung des Seilaufhängepunktes erfolgt und/oder wobei jeweils der erste Wert der Solltrajektorie zur Steuerung und/oder Regelung herangezogen wird und/oder
wobei die Optimierungsfunktion mit einer größeren Abtastzeit arbeitet als die Regelung und/oder
wobei die Optimierungsfunktion auf eine Notfall-Trajektorienplanung zurückgreift, wenn keine gültige Lösung auffindbar ist.

10. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einer Messvorrichtung, welche eine aktuelle Seegangsbewegung aus Sensordaten ermittelt und einer Prognosevorrichtung, welche eine zukünftige Bewegung des Seilaufhängepunkts und/oder eines Lastabsetzpunktes anhand der ermittelten aktuellen Seegangsbewegung und eines Modells der Seegangsbewegung prognostiziert, wobei vorteilhafterweise das in der Prognosevorrichtung verwendete Modell der Seegangsbewegung unabhängig von den Eigenschaften, und insbesondere von der Dynamik des Schwimmkörpers ist, auf welchem der Kran und/oder der Lastabsetzpunkt angeordnet ist.

11. Kransteuerung nach Anspruch 10, wobei die Prognosevorrichtung die vorherrschenden Moden der Seegangsbewegung aus den Daten der Messvorrichtung bestimmt, insbesondere über eine Frequenzanalyse, und anhand der bestimmten vorherrschenden Moden ein Modell des Seegangs erstellt, wobei vorteilhafterweise die Prognosevorrichtung das Modell anhand der Daten der Messvorrichtung laufend parametrisiert, wobei insbesondere ein Beobachter parametrisiert wird, wobei insbesondere Amplitude und Phase der Moden parametrisiert werden und/oder bei einer Änderung der vorherrschenden Moden des Seeganges das Modell aktualisiert wird.

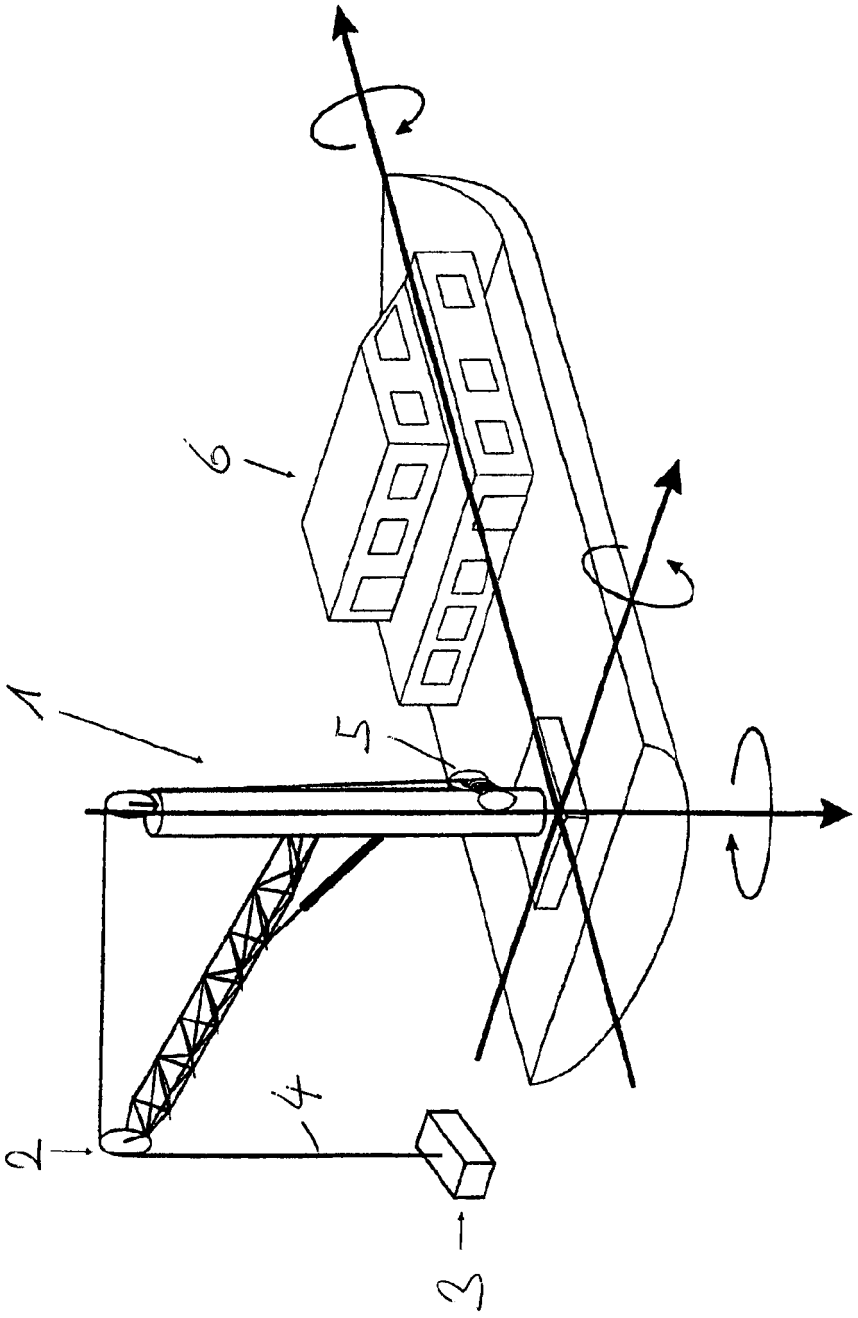
12. Kran mit einer Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche.

13. Verfahren zur Steuerung eines Krans, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist, wobei eine Seegangskompensation durch eine automatische Ansteuerung des Hubwerks die Bewegung des Seilaufhängepunkts und/oder eines Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgleicht,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Seegangskompensation bei der Berechung der Ansteuerung des Hubwerkes mindestens eine Beschränkung des Hubwerks berücksichtigt und/oder dass die Seegangskompensation anhand einer prognostizierten Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes eine Trajektorie der Position und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks berechnet, welche in einen Sollwert für eine nachgelagerte Regelung des Hubwerks eingeht.

14. Verfahren nach Anspruch 13 mittels einer Kransteuerung nach einem der Ansprüche 1 bis 11.

15. Software mit Code zur Durchführung eines Verfahrens nach Anspruch 13 oder 14.

Fig. 6



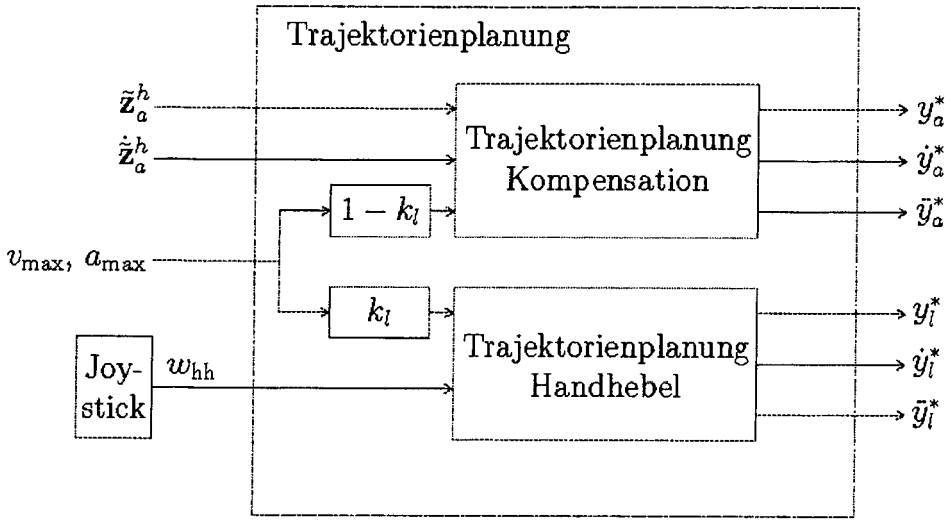

Trajektorienplanung
$\tilde{\mathbf{z}}_a^h$
$\dot{\tilde{\mathbf{z}}}_a^h$
Trajektorienplanung Kompensation
y_a^*
$\dot{y}_a^*$
$\ddot{y}_a^*$
$1 - k_l$
$v_{\max}$, $a_{\max}$
k_l
Trajektorienplanung Handhebel
y_l^*
$\dot{y}_l^*$
$\ddot{y}_l^*$
Joy-stick
w_{hh}

Fig. 1

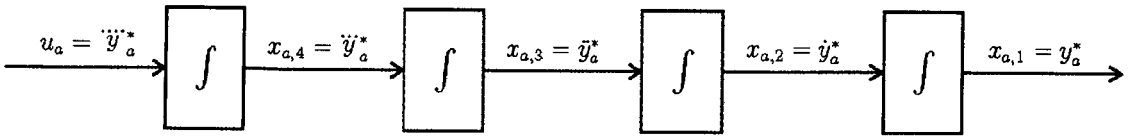


Fig. 2:

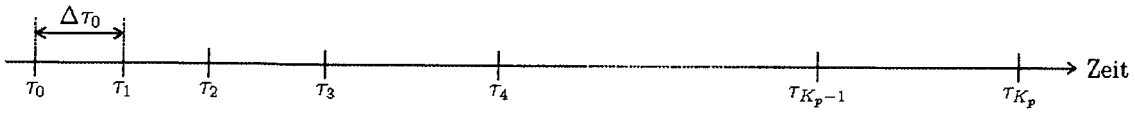


Fig. 3:

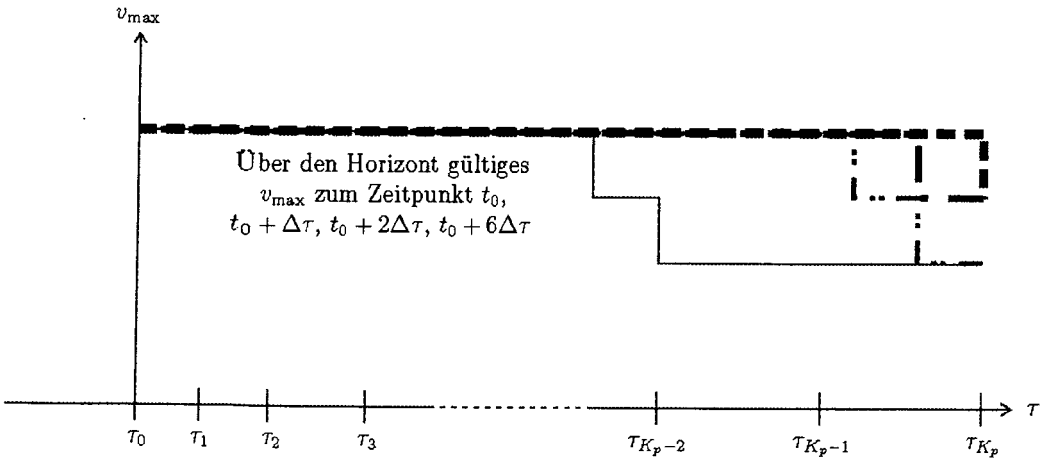


Fig. 4:

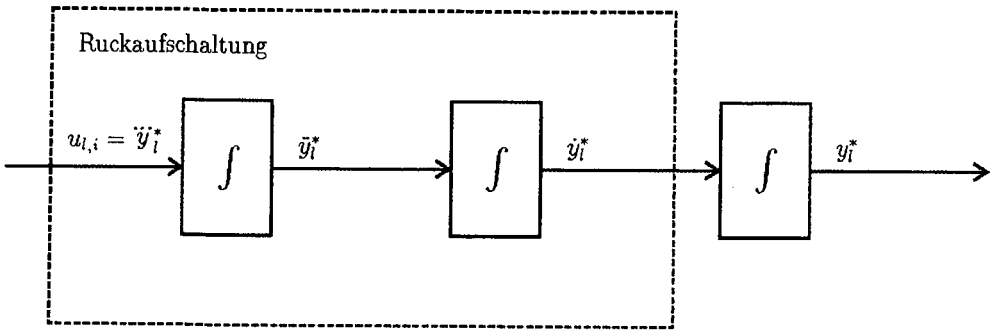

Ruckaufschaltung
$u_{l,i} = \dddot{y}_l^*$
$\int$
$\ddot{y}_l^*$
$\int$
$\dot{y}_l^*$
$\int$
y_l^*

Fig. 5:

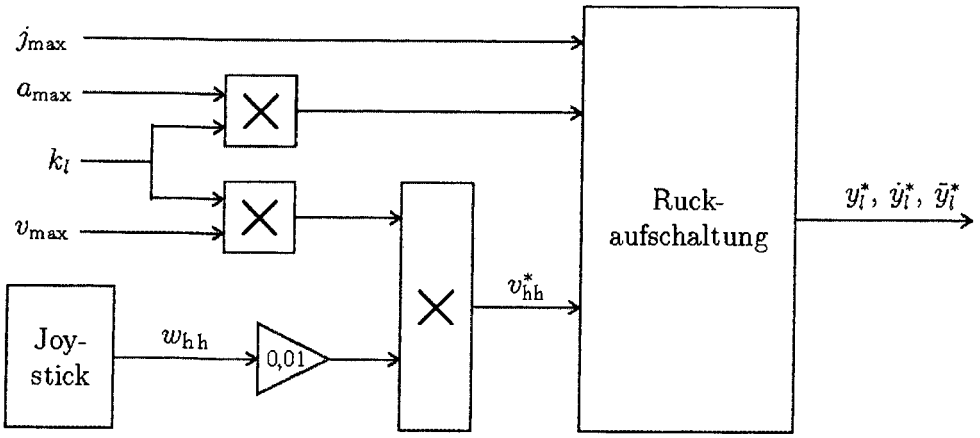

j_{max}
a_{max}
k_l
v_{max}
Joy-stick
w_{hh}
0,01
v_{hh}^*
Ruck-aufschaltung
$y_l^*, \dot{y}_l^*, \ddot{y}_l^*$

Fig. 6:

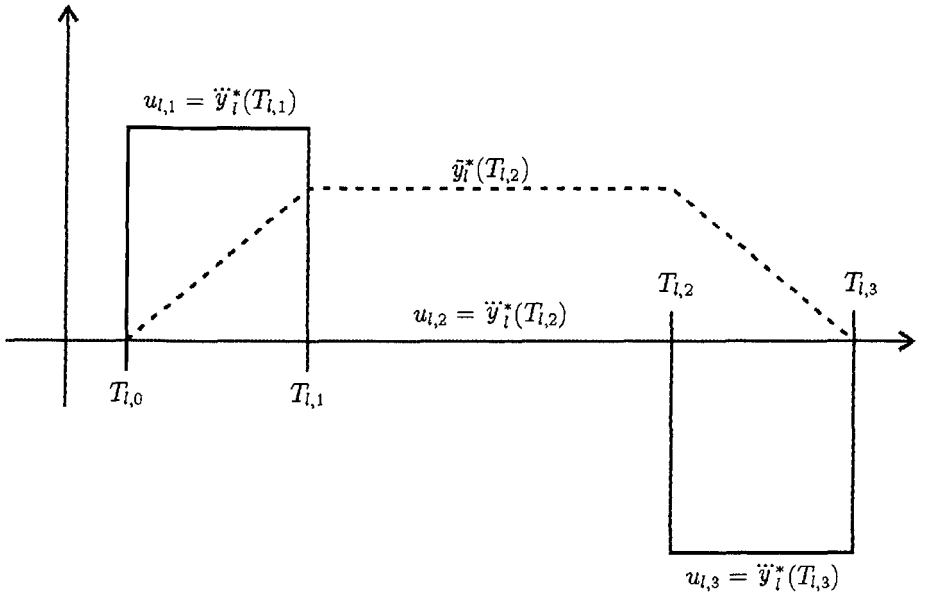

$u_{l,1} = \dddot{y}_l^*(T_{l,1})$
$\ddot{y}_l^*(T_{l,2})$
$T_{l,2}$
$T_{l,3}$
$u_{l,2} = \dddot{y}_l^*(T_{l,2})$
$T_{l,0}$
$T_{l,1}$
$u_{l,3} = \dddot{y}_l^*(T_{l,3})$

Fig. 7:

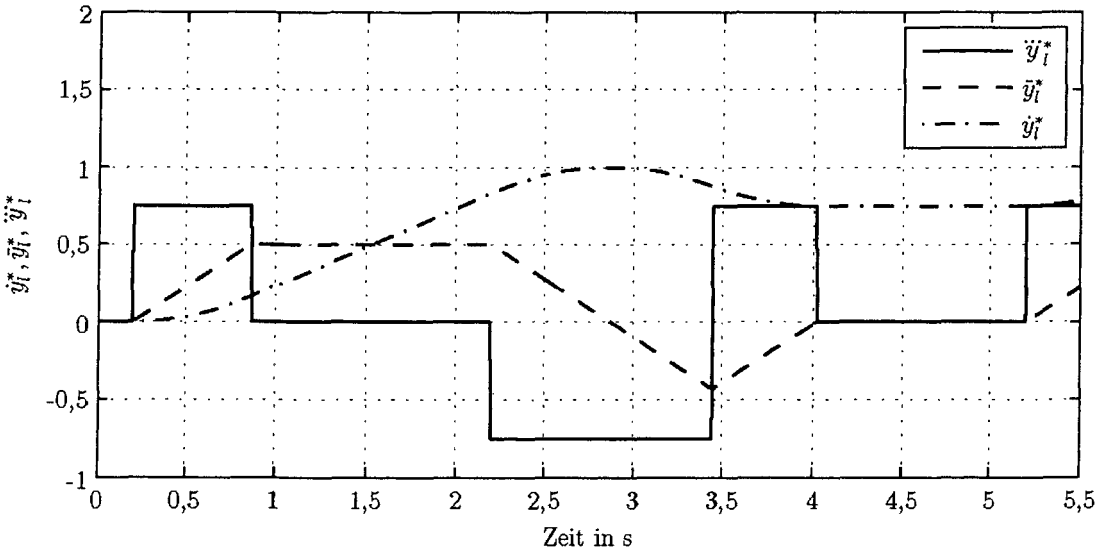

2
1,5
1
0,5
0
-0,5
-1
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4
4,5
5
5,5
Zeit in s
$\dddot{y}_l^*, \ddot{y}_l^*, \dot{y}_l^*$
$\dddot{y}_l^*$
$\ddot{y}_l^*$
$\dot{y}_l^*$

Fig. 8:

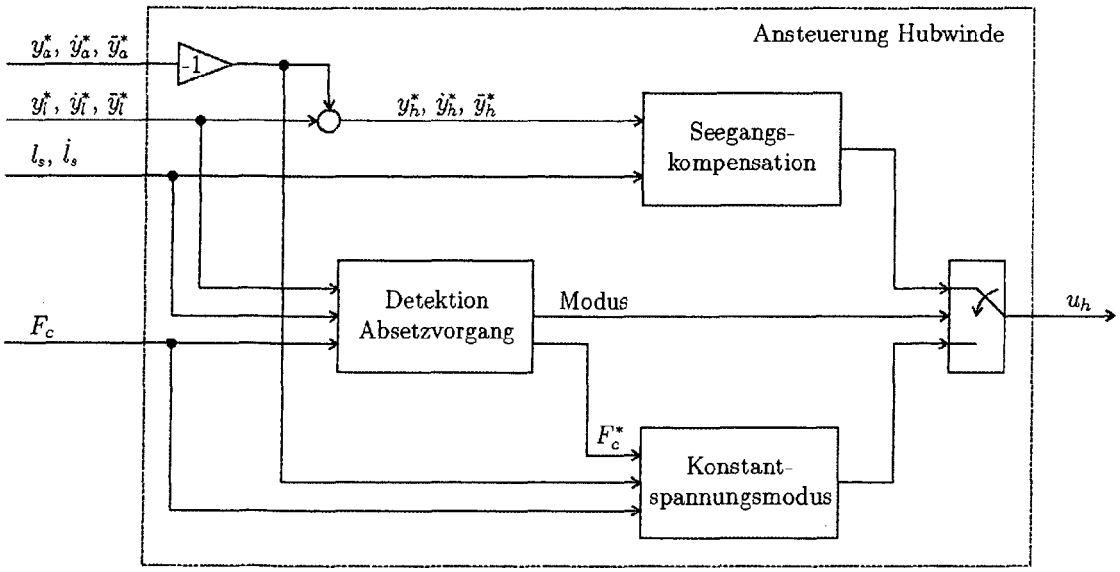

Ansteuerung Hubwinde
$y_a^*, \dot{y}_a^*, \ddot{y}_a^*$
-1
$y_l^*, \dot{y}_l^*, \ddot{y}_l^*$
$l_s, \dot{l}_s$
F_c
$y_h^*, \dot{y}_h^*, \ddot{y}_h^*$
Seegangs-
kompensation
Detektion
Absetzvorgang
Modus
F_c^*
Konstant-
spannungsmodus
u_h

Fig. 9:

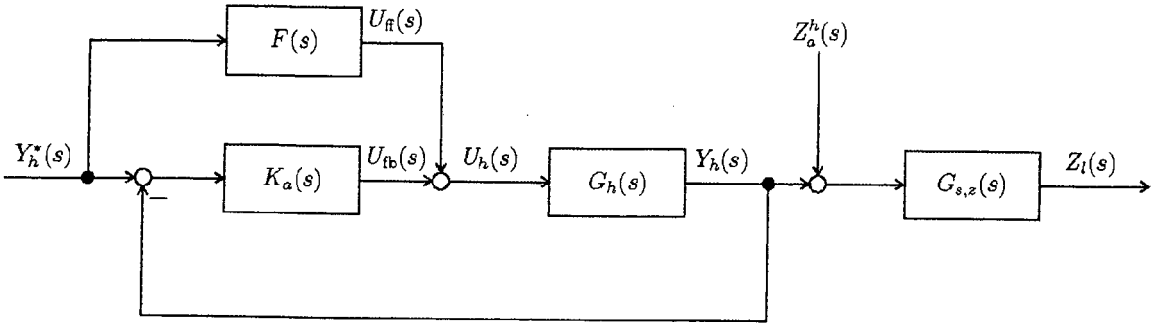

$F(s)$
$U_{\mathrm{ff}}(s)$
$Z_a^h(s)$
$Y_h^*(s)$
$K_a(s)$
$U_{\mathrm{fb}}(s)$
$U_h(s)$
$G_h(s)$
$Y_h(s)$
$G_{s,z}(s)$
$Z_l(s)$
−

Fig. 10:

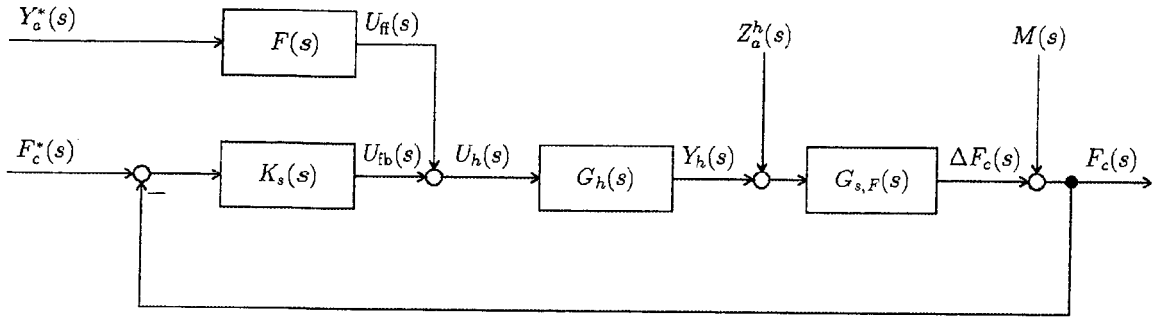

$Y_a^*(s)$
$F(s)$
$U_{\mathrm{ff}}(s)$
$Z_a^h(s)$
$M(s)$
$F_c^*(s)$
$K_s(s)$
$U_{\mathrm{fb}}(s)$
$U_h(s)$
$G_h(s)$
$Y_h(s)$
$G_{s,F}(s)$
$\Delta F_c(s)$
$F_c(s)$
−

Fig. 11:

Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 12 00 8290

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE

Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	US 6 505 574 B1 (NAUD STEVEN F [US] ET AL) 14. Januar 2003 (2003-01-14) * das ganze Dokument *	1-15	INV. B66C13/06 B66D1/52
X	WO 2005/090226 A1 (SUBSEA 7 BV [NL]; DAVIDSON DANIEL [GB]) 29. September 2005 (2005-09-29) * Zusammenfassung *	1-15	
A	EP 1 757 554 A2 (ROCKWELL AUTOMATION TECH INC [US]) 28. Februar 2007 (2007-02-28) * das ganze Dokument *	1	

RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)

B66C
B66D

Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt

Recherchenort	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer
Den Haag	24. Mai 2013	Faymann, L

KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE

X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet
Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie
A : technologischer Hintergrund
O : nichtschriftliche Offenbarung
P : Zwischenliteratur

T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze
E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
D : in der Anmeldung angeführtes Dokument
L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument

& : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR. EP 12 00 8290

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

24-05-2013

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 6505574 B1	14-01-2003	KEINE	
WO 2005090226 A1	29-09-2005	BR PI0508903 A	07-08-2007
		GB 2427186 A	20-12-2006
		GB 2448432 A	15-10-2008
		US 2007272906 A1	29-11-2007
		WO 2005090226 A1	29-09-2005
EP 1757554 A2	28-02-2007	EP 1757554 A2	28-02-2007
		US 2007050115 A1	01-03-2007

EPO FORM P0461

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

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 102008024513 A1 **[0002] [0003] [0042] [0066]**
- DE 102008024513 **[0071] [0083]**