



(11)

EP 2 636 636 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
18.05.2016 Patentblatt 2016/20

(51) Int Cl.:
B66D 1/52 (2006.01) **B66C 13/06** (2006.01)
B66C 13/18 (2006.01) **B66C 13/04** (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **13000100.1**

(22) Anmeldetag: **09.01.2013**

(54) **Kransteuerung mit Aufteilung einer kinematisch beschränkten Größe des Hubwerks**

Crane controls with division of a kinematically limited value of the hoisting gear

Commande de grue avec répartition de la grandeur du dispositif de levage réduite par cinématique

(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**

(30) Priorität: **09.03.2012 DE 102012004802**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
11.09.2013 Patentblatt 2013/37

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

(72) Erfinder:
• **Schneider, Klaus, Dr.
88145 Hergatz (DE)**

• **Küchler, Sebastian, DI
71034 Böblingen (DE)**
• **Sawodny, Oliver, Dr.-Ing.
70186 Stuttgart (DE)**
• **Eberharter, Johannes Karl, Dr.
6822 Satteins (AT)**

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

(56) Entgegenhaltungen:
**EP-A1- 2 123 588 WO-A1-2005/090226
WO-A2-02/00543**

EP 2 636 636 B1

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).

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Kransteuerung für einen Kran, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist. Erfindungsgemäß weist die Kransteuerung eine aktive Seegangskompensation auf, welche durch eine Ansteuerung des Hubwerks die Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgleicht. Die Kransteuerung weist weiterhin eine Bedienersteuerung auf, welche das Hubwerk anhand von Vorgaben des Bedieners ansteuert.

[0002] Eine solche Kransteuerung ist beispielsweise 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 die Bahnsteuerung die prognostizierte Bewegung bei der Ansteuerung des Hubwerks berücksichtigt.

[0003] Die bekannte Kransteuerung ist jedoch für manche Anforderungen nicht hinreichend flexibel. Zudem können sich bei einem Ausfall der Seegangskompensation Probleme ergeben.

[0004] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, eine verbesserte Kransteuerung mit einer aktiven Seegangskompensation und einer Bedienersteuerung zur Verfügung zu stellen.

[0005] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß in einem ersten Aspekt gemäß Anspruch 1 gelöst, sowie in einem zweiten Aspekt gemäß Anspruch 4.

[0006] Die vorliegende Erfindung zeigt in einem ersten Aspekt eine Kransteuerung für einen Kran, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist. Dabei ist eine aktive Seegangskompensation vorgesehen, welche durch eine Ansteuerung des Hubwerks eine Bewegung des Seilhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgleicht. Weiterhin ist eine Bedienersteuerung vorgesehen, welche das Hubwerk anhand von Vorgaben des Bedieners ansteuert. Erfindungsgemäß ist dabei eine Aufteilung mindestens einer kinematisch beschränkten Größe des Hubwerks zwischen Seegangskompensation und Bedienersteuerung einstellbar. Hierdurch kann der Kranführer die mindestens eine kinematisch beschränkte Größe des Hubwerks selbst aufteilen und hierdurch bestimmen, welcher Anteil davon für die Kompensation des Seegangs, und welcher Anteil davon für die Bedienersteuerung zur Verfügung steht.

[0007] Bei der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe des Hubwerks kann es sich dabei bspw. um die maximal zur Verfügung stehende Leistung und/oder maximal zur Verfügung stehende Geschwindigkeit und/oder maximal zur Verfügung stehende Beschleunigung des Hubwerks handeln.

[0008] Die Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe des Hubwerks kann daher eine Aufteilung der maximal zur Verfügung stehenden Leistung und/oder maximal zur Verfügung stehenden Geschwindigkeit und/oder maximal zur Verfügung stehenden Beschleunigung des Hubwerks umfassen.

[0009] Vorteilhafterweise erfolgt die Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe über mindestens einen Gewichtungsfaktor, über welchen die maximal zur Verfügung stehende Leistung und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks zwischen der Seegangskompensation und der Bedienersteuerung aufgeteilt wird. Insbesondere kann dabei die maximal zur Verfügung stehende Geschwindigkeit und/oder die maximal zur Verfügung stehende Beschleunigung des Hubwerks vom Kranführer zwischen Seegangskompensation und Bedienersteuerung aufgeteilt werden.

[0010] Vorteilhafterweise ist die Aufteilung zumindest in einem Teilbereich stufenlos einstellbar. Dies ermöglicht dem Kranführer eine gefühlvolle Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe des Hubwerks.

[0011] Weiterhin kann erfindungsgemäß die Seegangskompensation durch die Zuteilung der gesamten mindestens einen kinematisch beschränkten Größe des Hubwerks zur Bedienersteuerung abschaltbar sein. Dies ermöglicht es, über die Einstellung der Aufteilung gleichzeitig die aktive Seegangskompensation ganz auszuschalten.

[0012] Vorteilhafterweise ist dabei eine stufenlose Einstellung der Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe des Hubwerks ausgehend von und/oder hin zu komplett ausgeschalteter Bedienersteuerung möglich. Hierdurch ist ein stetiger Übergang zwischen einer reinen Bedienersteuerung und einer aktiven Seegangskompensation möglich.

[0013] 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. Weiterhin ist eine Bedienersteuerung vorgesehen, welche das Hubwerk anhand von Vorgaben des Bedieners ansteuert. Erfindungsgemäß weist die Steuerung dabei zwei getrennte Bahnplanungsmodule auf, über welche getrennt voneinander Trajektorien für die Seegangskompensation und für die Bedienersteuerung berechnet werden. Hierdurch kann der Kran bei einem Ausfall der Seegangskompensation weiterhin über die Bedienersteuerung angesteuert werden, ohne dass hierfür eine separate Steuereinheit verwendet werden müsste und ohne dass ein unterschiedliches Fahrverhalten entstehen würde. Vorteilhafterweise werden in den zwei getrennten Bahnplanungsmodulen dabei jeweils Soll-Trajektorien der Position und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks berechnet.

[0014] Weiterhin vorteilhafterweise werden die durch die zwei getrennten Bahnplanungsmodule vorgegebenen Trajektorien summiert und als Sollwerte für die Steuerung und/oder Regelung des Hubwerks verwendet.

[0015] Weiterhin kann dabei vorgesehen sein, dass die Regelung des Hubwerks Messwerte zur Position und/oder Geschwindigkeit der Hubwinde zurückführt und somit die Sollwerte mit Istwerten vergleicht. Weiterhin kann die Ansteuerung des Hubwerkes die Dynamik des Antriebs der Hubwinde berücksichtigen. Insbesondere kann hierfür eine entsprechende Vorsteuerung vorgesehen sein. Vorteilhafterweise beruht diese auf der Invertierung eines physikalischen Modells der Dynamik des Antriebs der Hubwinde.

[0016] Vorteilhafterweise berücksichtigen die zwei getrennten Bahnplanungsmodule dabei jeweils für sich genommen mindestens eine Beschränkung des Antriebs und generieren hierdurch Soll-Trajektorien, welche das Hubwerks tatsächlich anfahren kann.

[0017] Vorteilhafterweise teilt die Kransteuerung dabei mindestens eine kinematisch beschränkte Größe zwischen Seegangskompensation und Bedienersteuerung auf. Insbesondere wird hierfür die maximal zur Verfügung stehende Leistung und/oder die maximal zur Verfügung stehende Geschwindigkeit und/oder die maximal zur Verfügung stehende Beschleunigung des Hubwerkes zwischen der Seegangskompensation und der Bedienersteuerung aufgeteilt.

[0018] Vorteilhafterweise werden die Trajektorien in den beiden getrennten Bahnplanungsmodulen dann unter Berücksichtigung der jeweils zugeteilten mindestens einen kinematisch beschränkten Größe, insbesondere der maximal zur Verfügung stehenden Leistung und/oder Geschwindigkeit und/oder der maximal zur Verfügung stehenden Beschleunigung, welche auf die Seegangskompensation bzw. die Bedienersteuerung entfällt, berechnet.

[0019] Durch diese Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe nutzt man zwar die Stellgrößenbeschränkung unter Umständen nicht vollständig aus. Die Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe ermöglicht jedoch die Verwendung von zwei komplett getrennten Bahnplanungsmodulen, welche jeweils unabhängig voneinander die Antriebsbeschränkung berücksichtigen.

[0020] Der erste und der zweite Aspekt gemäß der vorliegenden Erfindung werden jeweils separat für sich beansprucht und können unabhängig voneinander implementiert werden. Besonders vorteilhaft werden jedoch die beiden Aspekte gemäß der vorliegenden Erfindung miteinander kombiniert.

[0021] Insbesondere ermöglicht die Verwendung zweier getrennter Bahnplanungsmodule gemäß dem zweiten Aspekt der vorliegenden Erfindung dabei eine besonders einfache Einstellbarkeit der Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe. Insbesondere kann dabei vom Kranfahrer vorgegeben werden, wie viel der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe für die Bedienersteuerung und die Seegangskompensation zur Verfügung steht, wobei diese Aufteilung dann von den beiden Bahnplanungsmodulen bei der Berechnung der Soll-Trajektorien zur Ansteuerung des Hubwerks als Beschränkung berücksichtigt wird.

[0022] Erfindungsgemäß kann bei einer Kransteuerung gemäß einer der oben beschriebenen Aspekte die Seegangskompensation eine Optimierungsfunktion aufweisen, welche anhand einer prognostizierten Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes und unter Berücksichtigung der für die Seegangskompensation zur Verfügung stehenden Leistung eine Trajektorie berechnet. Insbesondere wird dabei eine Trajektorie zur Ansteuerung des Hubwerks berechnet, welche unter Berücksichtigung der für die Seegangskompensation zur Verfügung stehenden Leistung die prognostizierte Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes möglichst gut kompensiert. Insbesondere kann die Trajektorie dabei die Restbewegung der Last aufgrund der Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eine Differenzbewegung zwischen Last und Lastabsetzpunktes, welche aufgrund des Seegangs entsteht, minimieren.

[0023] Die Kransteuerung gemäß der vorliegenden Erfindung umfasst vorteilhafterweise eine Prognosevorrichtung, welche eine zukünftige Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes anhand der ermittelten aktuellen Seegangsbewegung und eines Modells der Seegangsbewegung prognostiziert, wobei eine Messvorrichtung vorgesehen ist, welche die aktuelle Seegangsbewegung anhand von Sensordaten ermittelt. Insbesondere prognostiziert die Prognosevorrichtung dabei die zukünftige Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes in vertikaler Richtung. Die Bewegung in horizontaler Richtung kann dagegen vernachlässigt werden.

[0024] Die Prognosevorrichtung und/oder die Messvorrichtung kann dabei so ausgeführt sein, wie dies in der DE 10 2008 024513 A1 beschrieben ist.

[0025] Die Bedienersteuerung kann weiterhin anhand von Vorgaben des Bedieners und unter Berücksichtigung der für die Bedienersteuerung zur Verfügung stehenden mindestens einen kinematisch beschränkten Größe eine Trajektorie berechnen. Vorteilhafterweise berücksichtigt also auch die Bedienersteuerung die für die Bedienersteuerung maximal zur Verfügung stehende mindestens eine kinematisch beschränkte Größe, und berechnet so aus Vorgaben des Bedieners eine Trajektorie zur Ansteuerung des Hubwerks.

[0026] Durch die Berücksichtigung der jeweils zur Verfügung stehenden mindestens einen kinematisch beschränkten Größe wird dabei sichergestellt, dass das Hubwerk tatsächlich den vorgegebenen Trajektorien folgen kann. Vorteilhafterweise erfolgt die Bestimmung der Trajektorien dabei jeweils in den oben beschriebenen Bahnplanungsmodulen.

[0027] Vorteilhafterweise weist die Kransteuerung mindestens ein Bedienelement auf, über welches der Kranfahrer die Aufteilung der zur Verfügung stehenden mindestens einen kinematisch beschränkten Größe einstellen kann, und

insbesondere den Gewichtungsfaktor vorgeben kann.

[0028] Vorteilhafterweise kann bei der erfindungsgemäßen Kransteuerung die Aufteilung der verfügbaren mindestens einen kinematisch beschränkten Größe während des Hubes verändert werden. Hierdurch kann der Kranführer beispielsweise für die Bedienersteuerung mehr Leistung zur Verfügung stellen, wenn er ein schnelleres Anheben wünscht. Umgekehrt kann der Seegangskompensation mehr Leistung zugeführt werden, wenn der Kranführer das Gefühl hat, dass der Seegang nicht ausreichend kompensiert wird. Bspw. kann der Kranführer so flexibel auf Änderungen des Wetters und des Seegangs eingehen.

[0029] Vorteilhafterweise erfolgt die Änderung der Aufteilung der verfügbaren mindestens einen kinematisch beschränkten Größe dabei wie oben beschrieben durch Veränderung des Gewichtungsfaktors.

[0030] Vorteilhafterweise weist die erfindungsgemäße Kransteuerung weiterhin eine Berechnungsfunktion auf, welche die aktuell zur Verfügung stehende mindestens eine kinematisch beschränkte Größe berechnet. Insbesondere kann dabei die maximal zur Verfügung stehende Leistung und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks berechnet werden. Da die maximal zur Verfügung stehende Leistung bzw. die maximal zur Verfügung stehende Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks sich während des Hubes ändern kann, kann diese so über die Berechnungsfunktion an die aktuellen Gegebenheiten des Hubes angepasst werden.

[0031] Vorteilhafterweise berücksichtigt die Berechnungsfunktion dabei die Länge des abgewickelten Seiles und/oder die Seilkraft und/oder die zum Antrieb des Hubwerks zur Verfügung stehende Leistung. Beispielsweise kann dabei je nach Länge des abgewickelten Seiles die maximal zur Verfügung stehende Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks unterschiedlich sein, da das Gewicht des abgewickelten Seiles gerade bei Hübten mit sehr langen Seilen das Hubwerk belastet. Zudem kann die maximal zur Verfügung stehende Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks je nach Masse der gehobenen Last schwanken. Weiterhin kann, insbesondere wenn ein Hybridantrieb mit einem Speicher eingesetzt wird, die zum Antrieb des Hubwerks zur Verfügung stehende Leistung je nach Speicherzustand schwanken. Vorteilhafterweise wird auch dies berücksichtigt.

[0032] Vorteilhafterweise wird dabei erfindungsgemäß jeweils die aktuell zur Verfügung stehende mindestens eine kinematisch beschränkte Größe gemäß der Vorgabe des Kranführers zwischen Seegangskompensation und Bedienersteuerung aufgeteilt, insbesondere anhand des vom Kranführer vorgegebenen Gewichtungsfaktors.

[0033] Vorteilhafterweise kann dabei die Optimierungsfunktion der Seegangskompensation eine Änderung in der Aufteilung der verfügbaren mindestens einen kinematisch beschränkten Größe und/oder eine Änderung der zur Verfügung stehenden mindestens einen kinematisch beschränkten Größe während eines Hubes zunächst nur am Ende des Prädiktionshorizonts einbeziehen. Dies ermöglicht eine stabile Optimierungsfunktion über den gesamten Prädiktionshorizont. Vorteilhafterweise wird dann mit fortschreitender Zeit die geänderte zur Verfügung stehende mindestens eine kinematisch beschränkte Größe an den Anfang des Prädiktionshorizonts durchgeschoben.

[0034] Vorteilhafterweise bestimmt die Optimierungsfunktion der Seegangskompensation erfindungsgemäß eine Soll-Trajektorie, welche in die Steuerung und/oder Regelung des Hubwerks eingeht. Insbesondere kann die Soll-Trajektorie dabei eine Soll-Bewegung des Hubwerks vorgeben. Die Optimierung kann dabei über eine Diskretisierung erfolgen.

[0035] Erfindungsgemäß kann die Optimierung dabei bei jedem Zeitschritt auf Grundlage einer aktualisierten Prognose der Bewegung des Lastaufnahmepunktes erfolgen.

[0036] 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.

[0037] Erfindungsgemäß kann die Optimierungsfunktion mit einer größeren Abtastzeit 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.

[0038] 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.

[0039] Vorteilhafterweise berechnet die Bedienersteuerung anhand eines von einem Bediener durch eine Eingabevorrichtung vorgegebenen Signals die vom Bediener gewünschte Geschwindigkeit der Hubwinde. Insbesondere kann dabei ein Handhebel vorgesehen sein.

[0040] Dabei kann die gewünschte Geschwindigkeit als der durch die Position der Eingabevorrichtung vorgegebenen Anteil der maximal zur Verfügung stehenden Geschwindigkeit für die Bedienersteuerung berechnet werden.

[0041] Vorteilhafterweise wird die Soll-Trajektorie dabei durch Integration des maximal zulässigen positiven Rucks erzeugt, bis die maximale Beschleunigung erreicht ist. Hierdurch wird sichergestellt, dass das Hubwerk durch die Bedienersteuerung nicht überlastet wird. Vorteilhafterweise entspricht die maximale Beschleunigung dabei dem Anteil an der maximal zur Verfügung stehenden Beschleunigung des Hubwerks, welche der Bedienersteuerung zugewiesen ist.

[0042] Weiterhin vorteilhafterweise wird daraufhin durch Integration der maximalen Beschleunigung die Geschwindigkeit erhöht, bis die gewünschte Geschwindigkeit durch ein Aufschalten des maximalen negativen Rucks erreicht werden kann.

[0043] Hierdurch wird sichergestellt, dass beim Erreichen der Soll-Geschwindigkeit die Beschleunigung wieder auf Null abgesunken ist, so dass unnötige Belastungen durch einen Beschleunigungssprung bei Erreichen der Soll-Geschwindigkeit vermieden werden.

[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. Vorteilhafterweise gleicht dabei eine Seegangskompensation durch eine automatische Ansteuerung des Hubwerkes die Bewegung des Seilaufhängepunkts und/oder Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise aus. Weiterhin wird das Hubwerk anhand von Vorgaben des Bedieners über eine Bedienersteuerung angesteuert. Erfindungsgemäß ist dabei gemäß einem ersten Aspekt vorgesehen, dass mindestens eine kinematisch beschränkte Größe des Hubwerks variabel zwischen der Seegangskompensation und der Bedienersteuerung aufgeteilt wird. Gemäß einem zweiten Aspekt ist vorgesehen, dass getrennt voneinander Trajektorien für die Seegangskompensation und für die Bedienersteuerung berechnet werden. Durch das erfindungsgemäße Verfahren ergeben sich damit die gleichen Vorteile, welche bereits oben im Hinblick auf die Kransteuerung beschrieben wurden. Wiederum werden besonders bevorzugt die beiden Aspekte miteinander kombiniert.

[0049] Bevorzugt wird das Verfahren dabei so durchgeführt, wie dies erfindungsgemäß bereits im Hinblick auf die Kransteuerung und deren Funktion näher dargestellt wurde. Weiterhin vorteilhafterweise dient das erfindungsgemäße Verfahren dabei zu der Verwendung, welche oben ebenfalls bereits dargestellt wurde.

[0050] Insbesondere kann das erfindungsgemäße Verfahren dabei mittels einer Kransteuerung durchgeführt werden, wie sie oben dargestellt wurde, bzw. mit Hilfe eines Kranes, wie er oben dargestellt wurde.

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

[0052] Die vorliegende Erfindung wird nun anhand eines Ausführungsbeispiels sowie Zeichnungen näher dargestellt.

[0053] 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,

5 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

10 Figur 11: ein Blockschaltbild der Ansteuerung für den Sollkraftmodus.

[0054] 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.

[0055] Dabei kann mindestens ein Sensor vorgesehen sein, welche die Position und/oder Geschwindigkeit des Hubwerkes misst und entsprechende Signale an die Kransteuerung übermittelt.

[0056] 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.

[0057] 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.

[0058] 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.

[0059] 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.

[0060] 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. Ggfs. 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.

[0061] Die Prognosevorrichtung und die Messvorrichtung sind vorteilhafterweise so ausgeführt, wie dies in der DE 10 2008 024513 A1 ausführlicher beschrieben ist.

[0062] 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 beschriebenen 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.

[0063] 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.

[0064] Alternativ könnte ein elektrischer Antrieb eingesetzt werden. Auch dieser könnte mit einem Energiespeicher verbunden werden.

[0065] 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

[0066] Zur Umsetzung des geforderten prädiktiven Verhaltens der aktiven Seegangskompensation wird im Ausführungsbeispiel

rungsbeispiel 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.

[0067] 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.

[0068] 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.

[0069] 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.

[0070] 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.

[0071] 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 $0 \leq k_l \leq 1$ 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_lv_{max} und k_la_{max} .

[0072] Eine Änderung von k_l lässt sich dabei während des Betriebs durchführen. Da die maximal mögliche Verfahrensgeschwindigkeit 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.

[0073] 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.

[0074] 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.

[0075] 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.

[0076] Daher wird zunächst mit Hilfe der über einen kompletten Zeithorizont vorhergesagten Vertikalpositionen und

-geschwindigkeiten des Seilaufhängepunkts $\tilde{z}_a^h = \left[\tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,1}) \quad \dots \quad \tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,K_p}) \right]^T$ und

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

[0077] 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 Referenztrajektorien für die Kompensation

[0078] 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.

[0079] 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

$\tilde{\mathbf{z}}_a^h = [\tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,1}) \quad \dots \quad \tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,K_p})]^T$ und $\dot{\tilde{\mathbf{z}}}_a^h = [\dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,1}) \quad \dots \quad \dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,K_p})]^T$, welche mit der entsprechenden Prädiktionszeit, z.B. mit Hilfe des in der DE 10 2008 024 513 beschriebenen Algorithmus, berechnet werden.

[0080] Unter Beachtung der durch k_p , v_{max} und a_{max} gültigen Beschränkungen lässt sich daraufhin eine optimale Zeitfolge für die Kompensationsbewegung bestimmen.

[0081] 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.

[0082] 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.

[0083] 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

[0084] Um die Anforderungen an die Stetigkeit der Referenztrajektorien für die Kompensationsbewegung zu erfüllen, darf frühestens deren dritte Ableitung $\ddot{y}_a^*$ 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.

[0085] Somit ist der Ruck $\ddot{y}_a^*$ 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

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

$$\mathbf{y}_a = \mathbf{x}_a \quad (1.1)$$

ausdrücken. Hier beinhaltet der Ausgang $\mathbf{y}_a = [y_a^*, \dot{y}_a^*, \ddot{y}_a^*, \ddot{y}_a^*]^T$ 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

$$\tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_{K_p-1} < \tau_{K_p} \quad (1.2)$$

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 $k = 0, \dots, K_p$ und $\Delta\tau$ das für die Trajektoriengenerierung verwendete Diskretisierungsintervall des Horizonts K_p ist.

[0086] 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 größeren 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.

[0087] Die für dieses Gitter gültige zeitdiskrete Systemdarstellung lässt sich anhand der analytischen Lösung

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

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

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

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

[0088] Durch Lösen des Optimalsteuerungsproblems soll eine Trajektorie geplant werden, welche der vorhergesagten Vertikalbewegung des Seilaufhängepunkts möglichst nahe folgt und gleichzeitig den gegebenen Beschränkungen genügt.

[0089] Um diese Anforderung zu erfüllen, lautet die Gütefunktion wie folgt:

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

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:

$$\mathbf{w}_a(\tau_k) = \begin{bmatrix} \tilde{z}_a^h(t_k + T_{p,k}) & \dot{\tilde{z}}_a^h(t_k + T_{p,k}) & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad k = 1, \dots, K_p. \quad (1.6)$$

[0090] Über die positiv semidefinite Diagonalmatrix

$$\mathbf{Q}_w(\tau_k) = \text{diag}(q_{w,1}(\tau_k), q_{w,2}(\tau_k), q_{w,3}, q_{w,4}), \quad k = 1, \dots, K_p \quad (1.7)$$

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.

[0091] 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):

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

und für den Eingang:

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

[0092] 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.

[0093] 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.

[0094] 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.

[0095] 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 $\mathbf{x}_a(\tau_0)$ 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.

[0096] 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 $\mathbf{x}_a(\tau_0) = [0,0,0,0]^T$ gewählt. Anschließend verwendet man den im letzten Optimierungsschritt für den Zeitschritt τ_1 berechneten Wert $\mathbf{x}_a(\tau_1)$ als Anfangsbedingung.

[0097] Die Berechnung der eigentlichen Lösung des QP-Problems erfolgt in jedem Zeitschritt über ein numerisches Verfahren, das man als QP-Solver bezeichnet.

[0098] 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 $\Delta\tau > \Delta t$.

[0099] 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 $\mathbf{x}_a(\tau_0)$ als Anfangsbedingung für die Simulation ver-

wendet 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

[0100] 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 $\ddot{y}_l^*$, welche dem Ruck entspricht, als sprungfähig erachten.

[0101] 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.

[0102] 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

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

[0103] 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.

[0104] 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.

[0105] 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.

[0106] 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.

[0107] 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.

[0108] 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:

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

wobei die minimal notwendige Zeit durch

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

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

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

[0109] 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.

[0110] Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Schaltfolgen des Rucks für die drei Phasen ableiten

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

mit $\mathbf{u}_l = [u_{l,1}, u_{l,2}, u_{l,3}]$ 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:

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

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

und nach der zweiten Phase:

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

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

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

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

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

[0111] 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:

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

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

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 $\dot{y}_l^*(T_{l,3}) = v_{hh}^*$ ergibt sich letztendlich:

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

[0112] Das Vorzeichen von $\tilde{a}$ folgt aus der Bedingung, dass ΔT_1 und ΔT_3 in (1.21) bzw. (1.22) positiv sein müssen.

[0113] In einem zweiten Schritt ermittelt sich aus $\tilde{a}$ und der maximal zulässigen Beschleunigung $k_l a_{\max}$ die eigentliche Maximalbeschleunigung:

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

[0114] 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

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

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

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

[0115] 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.

[0116] 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 $t = 3,5$ s ein. Hier wird die maximal zulässige Beschleunigung aufgrund der Handhebelstellung nicht vollständig erreicht. Die Folge ist, dass der erste und zweite Schaltzeitpunkt zusammenfallen und $\Delta T_2 = 0$ 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

[0117] 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.

[0118] 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 unabhängig vom Einsatz des Kranes auf einem Schiff und unabhängig von einer aktiven Seegangskompensation eingesetzt werden.

[0119] Durch die aktive Seegangskompensation soll die Hubwinde so angesteuert werden, dass die Windenbewegung die Vertikalbewegung des Seilaufhängepunkts z_a^h 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.

[0120] 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.

[0121] Die genaue Lastposition z_l und die Seilkraft an der Last F_{sl} 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_h , Koeffizient der hydrodynamischen Massenerhöhung C_a , Widerstandskoeffizient C_d und eingetauchtes Volumen ∇_h , allgemein nicht bekannt, wodurch eine zuverlässige Schätzung der Lastposition in der Praxis nahezu unmöglich ist.

[0122] Mithin stehen als Messgrößen für die Regelung lediglich die abgewickelte Seillänge l_s und die zugehörige Geschwindigkeit $\dot{l}_s$ 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 $\dot{l}_s$ 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

[0123] Fig. 10 verdeutlicht die Ansteuerung der Hubwinde für die aktive Seegangskompensation mit einem Block-

schaltbild im Frequenzbereich. Wie darin ersichtlich, erfolgt nur eine Rückführung der Seillänge und -geschwindigkeit $y_h = l_s$ und $\dot{y}_h = \dot{l}_s$ 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 $Z_a^h(s)$ 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.

[0124] Die Übertragungsfunktion des Antriebssystems von der Stellgröße $U_h(s)$ auf die abgewickelte Seillänge $Y_h(s)$ lässt sich als $1/T_h$ -System approximieren und ergibt sich zu

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

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

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

und lässt sich im Zeitbereich in Form einer differentiellen Parametrierung als

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

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

[0125] Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises, bestehend aus der Stabilisierung $K_a(s)$ und dem Windensystem $G_h(s)$, lässt sich aus Fig. 10 zu

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

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 $1/s$ -Verhalten besitzen [9]. Dies lässt sich beispielsweise durch einen PID-Regler mit

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

erreichen. Demnach folgt für den geschlossenen Kreis:

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

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

2.2 Detektion des Absetzvorgangs

[0126] 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 FederMasse-Element approximiert. Somit berechnet sich die wirkende Kraft am Seilaufhängepunkt näherungsweise zu

$$F_c = k_c \Delta l_c, \quad (2.7)$$

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

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

[0127] 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:

$$k_c \Delta l_c = m_f g. \quad (2.9)$$

[0128] Durch Umformen von (2.8) ergibt sich

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

[0129] Anhand eines Koeffizientenvergleichs zwischen (2.9) und (2.10) lässt sich die äquivalente Federkonstante als

$$k_c = \frac{E_s A_s}{l_s} \quad (2.11)$$

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.

[0130] Trotzdem fließt in die Kraftmessung am Seilaufhängepunkt die volle Gewichtskraft des Seils $\mu_s l_s g$ ein.

[0131] 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

$$F_c = (m_e + \mu_s l_s) g + \Delta F_c \quad (2.12)$$

mit

$$\Delta F_c = -k_c \Delta l_s, \quad (2.13)$$

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:

$$\Delta F_c < \Delta \hat{F}_c. \quad (2.14)$$

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

$$\dot{F}_c < \hat{F}_c. \quad (2.15)$$

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

$$\dot{y}_l^* \geq 0. \quad (2.16)$$

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

$$l_s > l_{s,\min}. \quad (2.17)$$

[0132] Die Abnahme der negativen Federkraft ΔF_c berechnet sich dabei jeweils in Bezug auf den letzten Hochpunkt $\bar{F}_c$ im gemessenen Kraftsignal F_c . Zur Unterdrückung von Messrauschen und hochfrequenten Störungen wird das Kraftsignal durch ein entsprechendes Tiefpassfilter vorverarbeitet.

[0133] 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 $\bar{F}_c$ 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.

[0134] Der Schwellwert für die Änderung der Federkraft berechnet sich in Abhängigkeit vom letzten Hochpunkt im gemessenen Kraftsignal zu

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

wobei $\chi_1 < 1$ und der Maximalwert $\Delta \hat{F}_{c,\max}$ experimentell bestimmt wurden. Der Schwellwert für die Ableitung des Kraftsignals $\dot{\hat{F}}_c$ lässt sich aus der zeitlichen Ableitung von (2.7) und der maximal zulässigen Handhebelgeschwindigkeit $k_V v_{\max}$ zu

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

abschätzen. Die beiden Parameter $\chi_2 < 1$ und $\hat{F}_{c,\max}$ wurden ebenfalls experimentell ermittelt.

[0135] 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 $F_{l,\text{stat}}$ vorgegeben. Dazu wird $F_{l,\text{stat}}$ in der Phase der Seegangskompensation unter Beachtung der bekannten Seilmasse $\mu_s l_s$ berechnet:

$$F_{l,\text{stat}} = F_{c,\text{stat}} - \mu_s l_s g. \quad (2.20)$$

[0136] Dabei bezeichnet $F_{c,\text{stat}}$ 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

$$F_c^* = p_s F_{l,\text{stat}} + \mu_s l_s g, \quad (2.21)$$

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^* .

[0137] 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

[0138] 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.

[0139] 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.

[0140] Der gemessene Ausgang $F_c(s)$ ergibt sich aus Fig. 11 zu

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

mit den beiden Übertragungsfunktionen

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

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

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

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

[0141] Wie aus (2.22) hervorgeht, wird durch eine stabile Übertragungsfunktion $G_{CT,1}(s)$ der Kompensationsfehler $E_a(s)$ ausgeglichen und die Windenposition indirekt stabilisiert. Die Anforderung an den Regler $K_s(s)$ resultiert auch in diesem Fall aus dem erwarteten Führungssignal u , welches nach einer Übergangsphase durch die konstante Sollkraft u aus (2.21) gegeben ist. Zur Vermeidung einer stationären Regelabweichung bei solch einer konstanten Führungsgröße muss die offene Kette $K_s(s)G_h(s)G_{s,F}(s)$ I -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:

$$K_s(s) = -\frac{T_h}{K_h v_h(jl)} \kappa_{CT}, \quad \kappa_{CT} > 0. \quad (2.26)$$

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, und einer Bedienersteuerung, welche das Hubwerk anhand von Vorgaben des Bedieners ansteuert, **dadurch gekennzeichnet,** **dass** die Aufteilung mindestens einer kinematisch beschränkten Größe des Hubwerks zwischen Seegangskompensation und Bedienersteuerung einstellbar ist.
2. Kransteuerung nach Anspruch 1, wobei die Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe des Hubwerks eine Aufteilung der maximal zur Verfügung stehenden Leistung und/oder maximal zur Verfügung stehenden Geschwindigkeit und/oder maximal zur Verfügung stehenden Beschleunigung des Hubwerks umfasst und/oder wobei die Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe 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.
3. Kransteuerung nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Aufteilung zumindest über einen Teilbereich stufenlos einstellbar ist und/oder wobei die Seegangskompensation über die Zuteilung der gesamten mindestens einen kinematisch beschränkten Größe zur Bedienersteuerung ausschaltbar ist.
4. Kransteuerung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuerung zwei getrennte Bahnplanungsmodule aufweist, über welche getrennt voneinander Trajektorien für die Seegangskompensation und für die Bedienersteuerung berechnet werden.

5. Kransteuerung nach Anspruch 4, wobei die durch die zwei getrennten Bahnplanungsmodule vorgegebenen Trajektorien summiert werden und als Sollwerte für die Steuerung und/oder Regelung des Hubwerks dienen, wobei die Regelung des Hubwerks vorteilhafterweise Messwerte zur Position und/oder Geschwindigkeit der Hubwinde zurückführt und/oder die Dynamik des Antriebes der Hubwinde berücksichtigt.
5
6. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Seegangskompensation eine Optimierungsfunktion aufweist, welche anhand einer prognostizierten Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes und unter Berücksichtigung der für die Seegangskompensation zur Verfügung stehenden mindestens einen kinematisch beschränkten Größe eine Trajektorie berechnet und/oder wobei die Bedienersteuerung anhand von Vorgaben des Bedieners und unter Berücksichtigung der für die Bedienersteuerung zur Verfügung stehenden mindestens einen kinematisch beschränkten Größe eine Trajektorie berechnet.
10
7. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größewährend eines Hubes verändert werden kann, insbesondere durch Veränderung des Gewichtungsfaktors.
15
8. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einer Berechnungsfunktion, welche die aktuell zur Verfügung stehende mindestens eine kinematisch beschränkte Größe, und insbesondere die maximal zur Verfügung stehende Leistung und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung des Hubwerks 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.
20
9. Kransteuerung nach Anspruch 7 oder 8, wobei die Optimierungsfunktion der Seegangskompensation eine Änderung in der Aufteilung der mindestens einen kinematisch beschränkten Größe des Hubwerks und/oder eine Änderung der zur Verfügung stehenden mindestens einen kinematisch beschränkten Größe des Hubwerks während eines Hubes zunächst nur am Ende des Prädiktionshorizonts einbezieht und dann vorteilhafterweise mit fortschreitender Zeit an den Anfang schiebt.
25
10. 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 Lastaufnahmepunktes erfolgt und/oder
30
wobei jeweils der erste Wert der Solltrajektorie zur Regelung herangezogen wird und/oder
wobei die Optimierungsfunktion mit einer größeren Abtastzeit arbeitet als die Regelung und/oder
35
wobei die Optimierungsfunktion auf eine Notfall-Trajektorienplanung zurückgreift, wenn keine gültige Lösung auffindbar ist.
11. Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Bedienersteuerung anhand eines von einem Bediener durch eine Eingabevorrichtung, insbesondere einen Handhebel, vorgegebenen Signals eine vom Bediener gewünschte Geschwindigkeit berechnet, und/oder wobei die Bahnplanung der Bedienersteuerung die Trajektorie durch Integration des maximal zulässigen positiven Rucks erzeugt, bis die maximale Beschleunigung erreicht ist, und daraufhin vorteilhafterweise durch Integration der maximalen Beschleunigung, bis die gewünschte Geschwindigkeit durch ein Umschalten des maximalen negativen Rucks erreicht werden kann.
40
12. Kran mit einer Kransteuerung nach einem der vorangegangenen Ansprüche.
45
13. Verfahren zur Steuerung eines Krans, welcher ein Hubwerk zum Heben einer an einem Seil hängenden Last aufweist, mit
wobei eine Seegangskompensation durch eine automatische Ansteuerung des Hubwerks die Bewegung des Seilaufhängepunktes und/oder eines Lastabsetzpunktes aufgrund des Seegangs zumindest teilweise ausgleicht, und
wobei das Hubwerk anhand von Vorgaben des Bedieners über eine Bedienersteuerung angesteuert wird,
dadurch gekennzeichnet,
dass mindestens eine kinematisch beschränkte Größe des Hubwerks variabel zwischen der Seegangskompensation und Bedienersteuerung aufgeteilt wird und/oder wobei getrennt voneinander Trajektorien für die Seegangskompensation und für die Bedienersteuerung berechnet werden.
50
55
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.

Claims

1. A crane controller for a crane which includes a hoisting gear for lifting a load hanging on a cable, comprising an active heave compensation which by actuating the hoisting gear at least partly compensates the movement of the cable suspension point and/or a load deposition point due to the heave, and an operator control which actuates the hoisting gear with reference to specifications of the operator,
characterized in
that the division of at least one kinematically constrained quantity of the hoisting gear is adjustable between heave compensation and operator control.
2. The crane controller according to claim 1, wherein the division of the at least one kinematically constrained quantity of the hoisting gear comprises a division of the maximum available power and/or maximum available velocity and/or maximum available acceleration of the hoisting gear and/or wherein the division of the at least one kinematically constrained quantity is effected via at least one weighting factor, via which the maximum available power and/or velocity and/or acceleration of the hoisting gear is split up between the heave compensation and the operator control.
3. The crane controller according to claim 1 or 2, wherein the division is steplessly adjustable at least over a partial region and/or wherein the heave compensation can be switched off by assigning the entire at least one kinematically constrained quantity to the operator control.
4. The crane controller according to any of claims 1 to 3, **characterized in that** the controller includes two separate path planning modules via which trajectories for the heave compensation and for the operator control are calculated separate from each other.
5. The crane controller according to claim 4, wherein the trajectories specified by the two separate path planning modules are added up and serve as setpoint values for the control and/or regulation of the hoisting gear, wherein the control of the hoisting gear advantageously feeds back measured values to the position and/or velocity of the hoisting winch and/or takes account of the dynamics of the drive of the hoisting winch.
6. The crane controller according to any of the preceding claims, wherein the heave compensation includes an optimization function which calculates a trajectory with reference to a predicted movement of the cable suspension point and/or a load deposition point and taking into account the at least one kinematically constrained quantity available for the heave compensation and/or wherein the operator control calculates a trajectory with reference to specifications of the operator and taking into account the at least one kinematically constrained quantity available for the operator control.
7. The crane controller according to any of the preceding claims, wherein the division of the at least one kinematically constrained quantity can be changed during a lift, in particular by varying the weighting factor.
8. The crane controller according to any of the preceding claims, with a calculation function which calculates the currently available at least one kinematically constrained quantity, and in particular the maximum available power and/or velocity and/or acceleration of the hoisting gear, wherein the calculation function advantageously takes account of the length of the unwound cable and/or the cable force and/or the power available for driving the hoisting gear.
9. The crane controller according to claim 7 or 8, wherein the optimization function of the heave compensation initially includes a change in the division of the at least one kinematically constrained quantity of the hoisting gear and/or a change of the available at least one kinematically constrained quantity of the hoisting gear during a lift only at the end of the prediction horizon and then advantageously pushes the same to the beginning with progressing time.
10. The crane controller according to any of the preceding claims, wherein the optimization function of the heave compensation determines a target trajectory which is included in the control and/or regulation of the hoisting gear, wherein the optimization can be effected at each time step on the basis of an updated prediction of the movement of the load lifting point and/or wherein the first value of the target trajectory each is used for the control and/or

wherein the optimization function works with a greater scan time than the control and/or wherein the optimization function makes use of an emergency trajectory planning when no valid solution can be found.

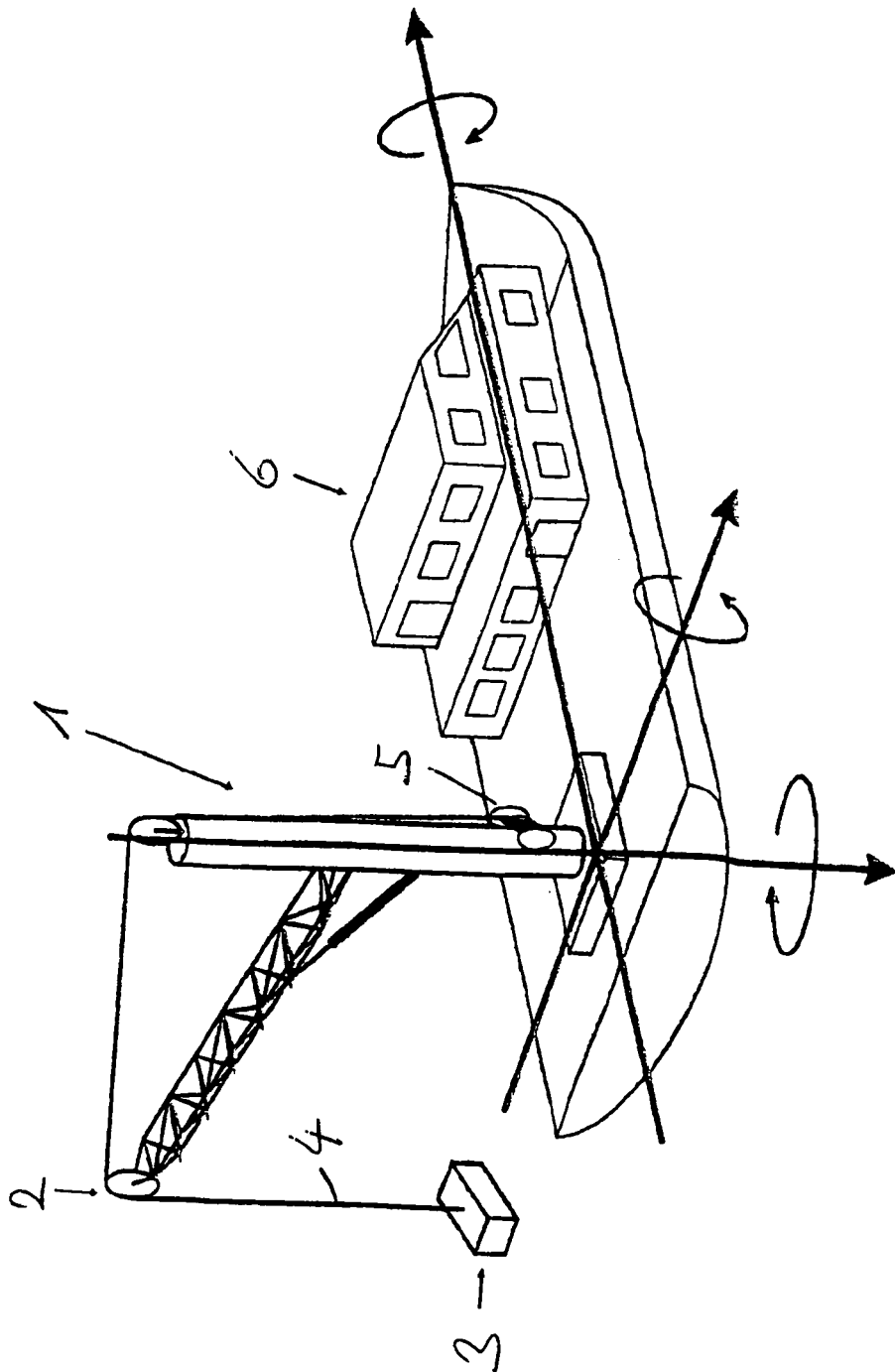
11. The crane controller according to any of the preceding claims, wherein the operator control calculates a velocity desired by the operator with reference to a signal specified by an operator through an input device, in particular a hand lever, and/or wherein the path planning of the operator control generates the trajectory by integration of the maximum admissible positive jerk, until the maximum acceleration is achieved, and thereupon advantageously can be achieved by integration of the maximum acceleration, until the desired velocity can be achieved by adding the maximum negative jerk.
12. A crane with a crane controller according to any of the preceding claims.
13. A method for controlling a crane which includes a hoisting gear for lifting a load hanging on a cable, wherein a heave compensation at least partly compensates the movement of the cable suspension point and/or a load deposition point due to the heave by an automatic actuation of the hoisting gear, and wherein the hoisting gear is actuated with reference to specifications of the operator via an operator control, **characterized in that** at least one kinematically constrained quantity of the hoisting gear is variably split up between the heave compensation and the operator control and/or wherein trajectories for the heave compensation and for the operator control are calculated separate from each other.
14. The method according to claim 13 by means of a crane controller according to any of claims 1 to 11.
15. Software with code for carrying out a method according to claim 13 or 14.

Revendications

1. Commande de grue pour une grue qui présente un mécanisme de levage pour lever une charge suspendue à un câble, comportant une compensation de houle active qui, par un pilotage du mécanisme de levage, compense au moins partiellement le mouvement du point de suspension de câble et/ou un point de dépose de charge en raison de la houle, et une commande par opérateur qui pilote le mécanisme de levage à l'aide de spécifications de l'opérateur, **caractérisée en ce que** la répartition d'au moins une grandeur cinématiquement réduite du mécanisme de levage est réglable entre la compensation de houle et la commande par opérateur.
2. Commande de grue selon la revendication 1, dans laquelle la répartition d'au moins une grandeur cinématiquement contrainte du mécanisme de levage comprend une répartition de la puissance disponible au maximum et/ou la vitesse disponible au maximum et/ou l'accélération disponible au maximum, et/ou dans laquelle la répartition d'au moins une grandeur cinématiquement contrainte est produite par au moins un facteur de pondération par l'intermédiaire duquel la puissance et/ou la vitesse et/ou l'accélération disponible au maximum du mécanisme de levage est/sont répartie(s) entre la compensation de houle et la commande par opérateur.
3. Commande de grue selon la revendication 1 ou 2, dans laquelle la répartition peut être réglée de manière continue sur une plage partielle et/ou dans laquelle la compensation de houle peut être désactivée par l'allocation de toute la au moins une grandeur cinématiquement contrainte du mécanisme de levage à la commande par opérateur.
4. Commande de grue selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** la commande présente deux modules de planification de cheminement par l'intermédiaire desquels des trajectoires sont calculées séparément l'une de l'autre pour la compensation de houle et pour la commande par opérateur.
5. Commande de grue selon la revendication 4, dans laquelle les trajectoires prédéterminées par les deux modules de planification de cheminement séparés sont totalisées et servent de valeurs de consigne pour la commande et/ou la régulation du mécanisme de levage, la régulation du mécanisme de levage renvoyant avantageusement des valeurs de mesure à la position et/ou la vitesse du treuil de levage et/ou tenant compte de la dynamique de l'entraînement du treuil de levage.

- 5 6. Commande de grue selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la compensation de houle présente une fonction d'optimisation qui, à l'aide d'un mouvement pronostiqué du point de suspension de câble et/ou d'un point de dépose de charge et en tenant compte de ladite au moins une grandeur cinématiquement contrainte, disponible pour la compensation de houle, une trajectoire est calculée et/ou dans laquelle la commande par opérateur calcule une trajectoire à l'aide des spécifications de l'opérateur et en tenant compte de ladite au moins une grandeur cinématiquement contrainte disponible.
- 10 7. Commande de grue selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la répartition d'au moins une grandeur cinématiquement contrainte pendant un levage peut être modifiée, en particulier en modifiant le facteur de pondération.
- 15 8. Commande de grue selon l'une des revendications précédentes, comportant une fonction de calcul qui calcule ladite au moins une grandeur cinématiquement contrainte actuellement disponible et en particulier la puissance et/ou la vitesse et/ou l'accélération disponibles au maximum, la fonction de calcul tenant avantageusement compte de la longueur du câble déroulé et/ou de la force de câble et/ou la puissance disponible pour l'entraînement du mécanisme de levage.
- 20 9. Commande de grue selon la revendication 7 ou 8, dans laquelle la fonction d'optimisation de la compensation de houle tient compte d'une modification dans la répartition de ladite au moins une grandeur cinématiquement contrainte du mécanisme de levage et/ou d'une modification de ladite au moins une grandeur cinématiquement contrainte du mécanisme de levage disponible, pendant un levage, tout d'abord seulement à la fin de l'horizon de prévision et ensuite, avec le temps, elle pousse celle-ci avantageusement vers le début.
- 25 10. Commande de grue selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la fonction d'optimisation de la compensation de houle détermine une trajectoire de consigne qui est retenue dans la commande et/ou dans la régulation du mécanisme de levage,
l'optimisation ayant lieu à chaque étape de temps sur la base d'une prévision actualisée du mouvement du point de réception de la charge et/ou
la première valeur de la trajectoire de consigne étant respectivement mise à contribution pour la régulation,
30 la fonction d'optimisation travaillant avec une durée de balayage plus grande que la régulation, et/ou
la fonction d'optimisation ayant recours à une planification de cheminement d'urgence si une solution valable ne peut être trouvée.
- 35 11. Commande de grue selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle la commande par opérateur calcule une vitesse souhaitée par l'opérateur sur la base d'un signal prédéterminé par un opérateur grâce à un dispositif d'entrée, en particulier un levier à main, et/ou dans laquelle la planification de cheminement de la commande par opérateur génère la trajectoire par intégration d'une secousse positive maximale admissible jusqu'à ce que l'accélération maximale soit atteinte, et ensuite, avantageusement par intégration de l'accélération maximale jusqu'à ce que la vitesse souhaitée puisse être atteinte par application de la secousse négative maximale.
- 40 12. Grue comportant une commande de grue selon l'une des revendications précédentes.
- 45 13. Procédé de commande d'une grue qui présente un mécanisme de levage pour soulever une charge suspendue à un câble,
dans lequel une compensation de houle compense au moins partiellement le mouvement du point de suspension du câble et/ou un point de dépose de la charge par pilotage automatique du mécanisme de levage, et
dans lequel le mécanisme de levage est piloté sur la base de spécifications de l'opérateur par l'intermédiaire d'une commande par opérateur, **caractérisé en ce que**
au moins une grandeur cinématiquement contrainte du mécanisme de levage est répartie de façon variable entre
50 la compensation de houle et la commande par opérateur et/ou des trajectoires pour la compensation de houle et pour la commande par opérateur sont calculées séparément l'une de l'autre.
14. Procédé selon la revendication 13 au moyen d'une commande de grue selon l'une des revendications 1 à 11.
- 55 15. Logiciel avec code pour la mise en oeuvre du procédé selon la revendication 13 ou 14.

Fig. 0



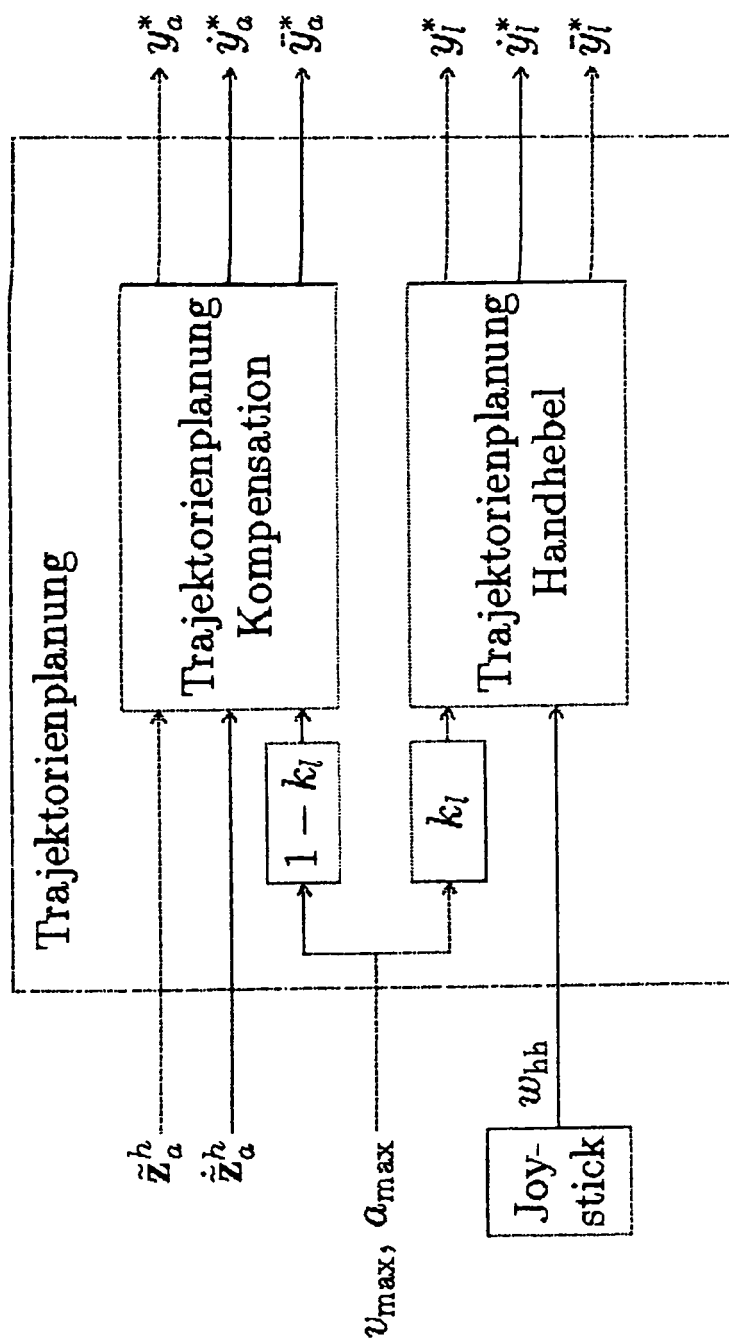


Fig. 1

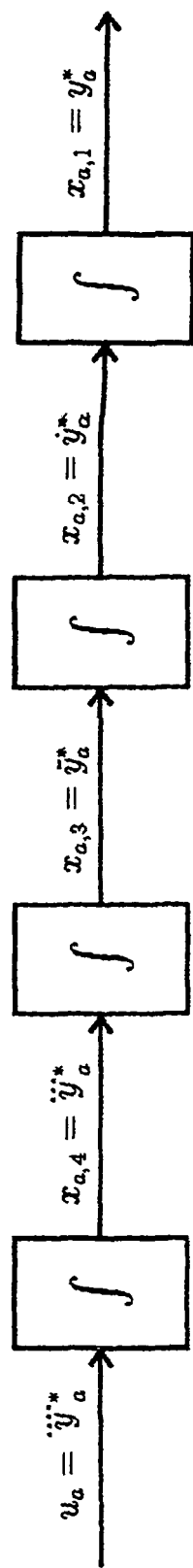


Fig. 2:



Fig. 3:

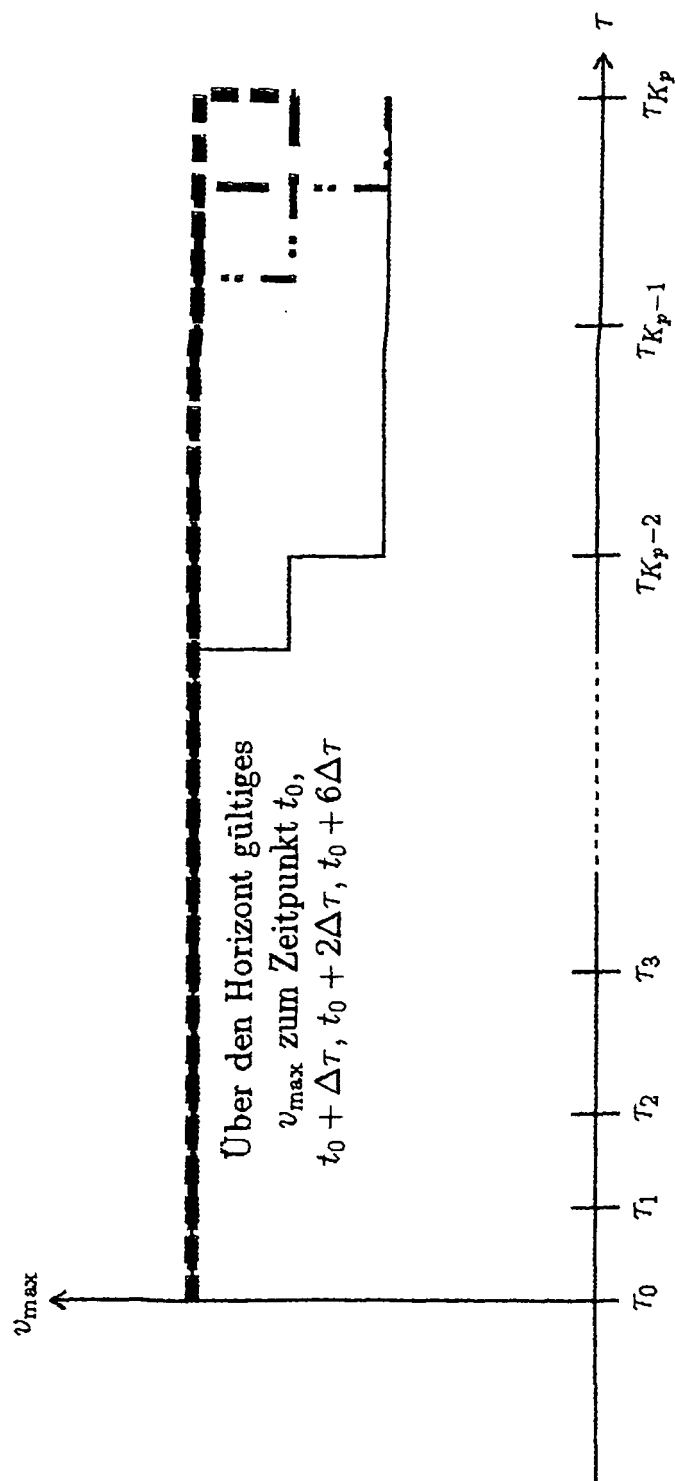


Fig. 4:

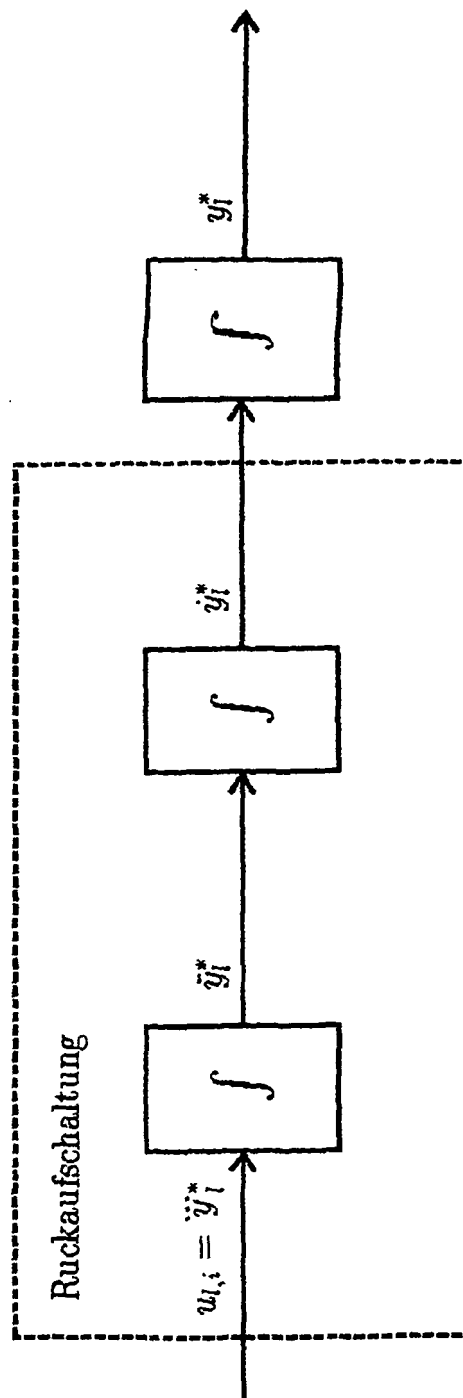


Fig. 5:

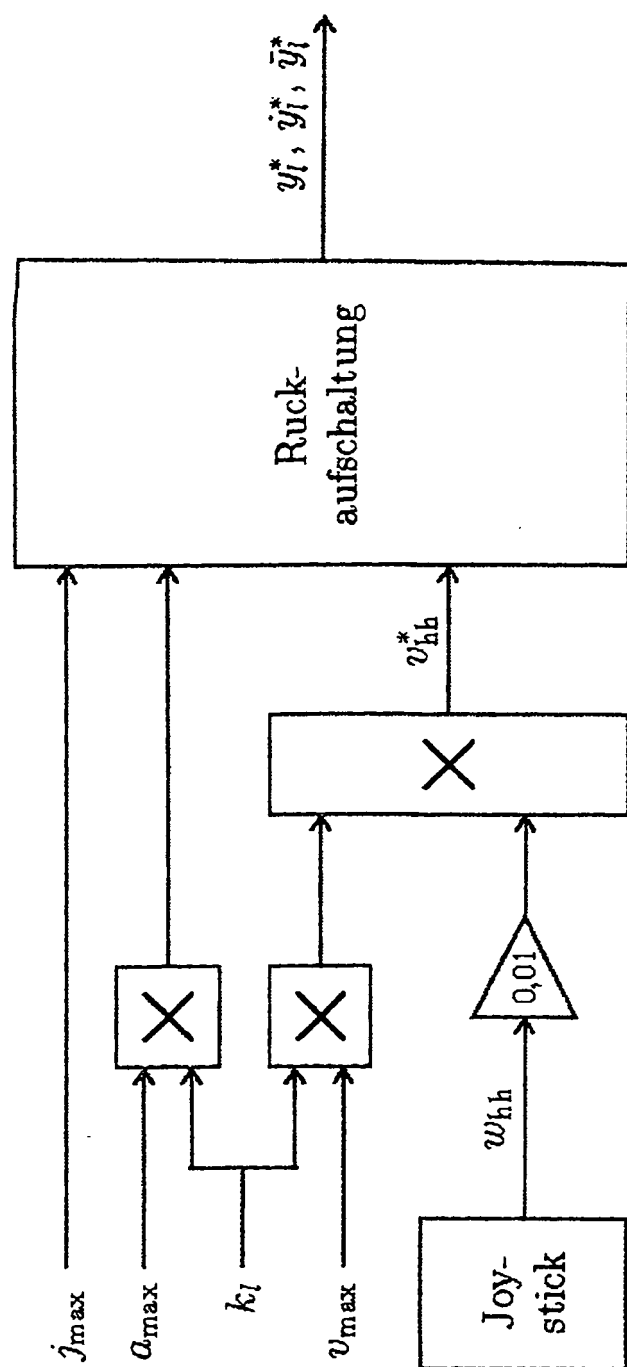


Fig. 6:

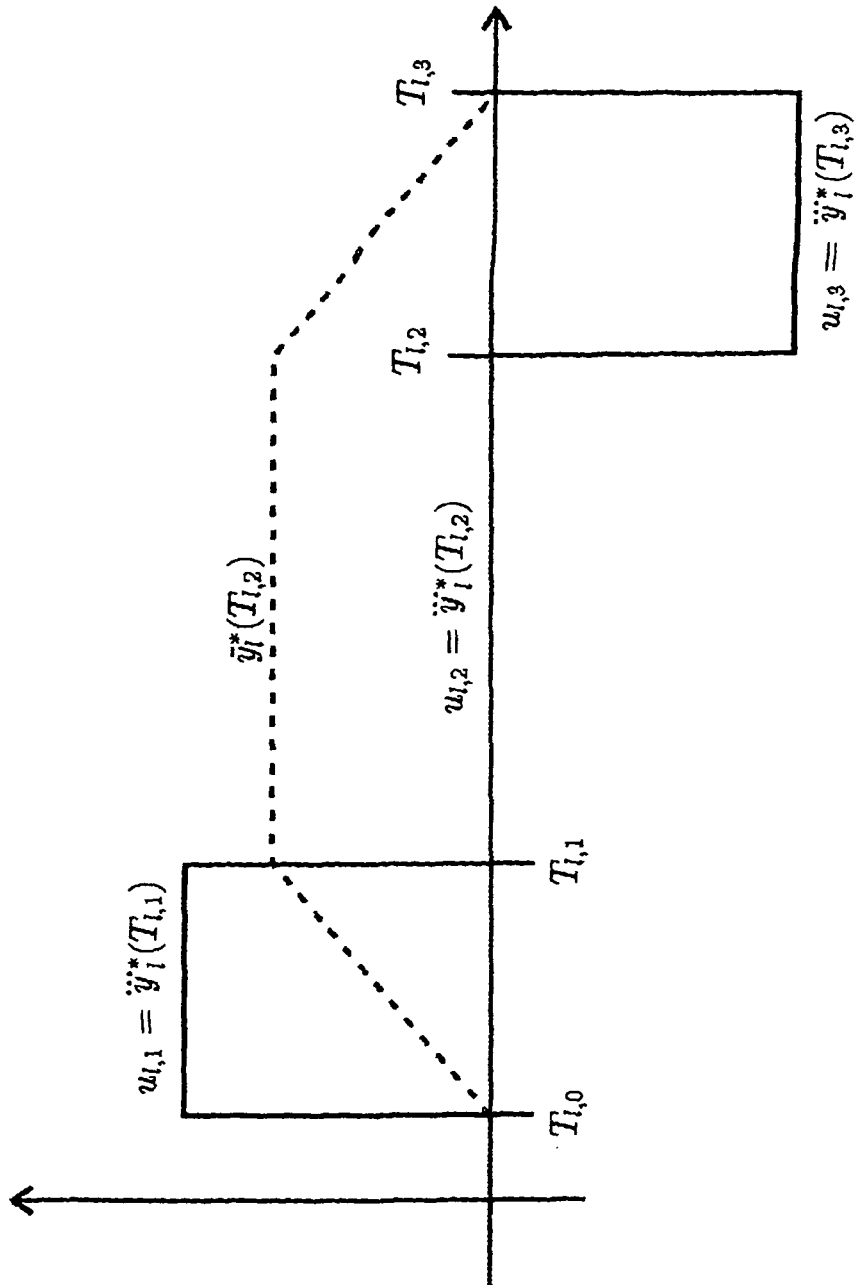


Fig. 7:

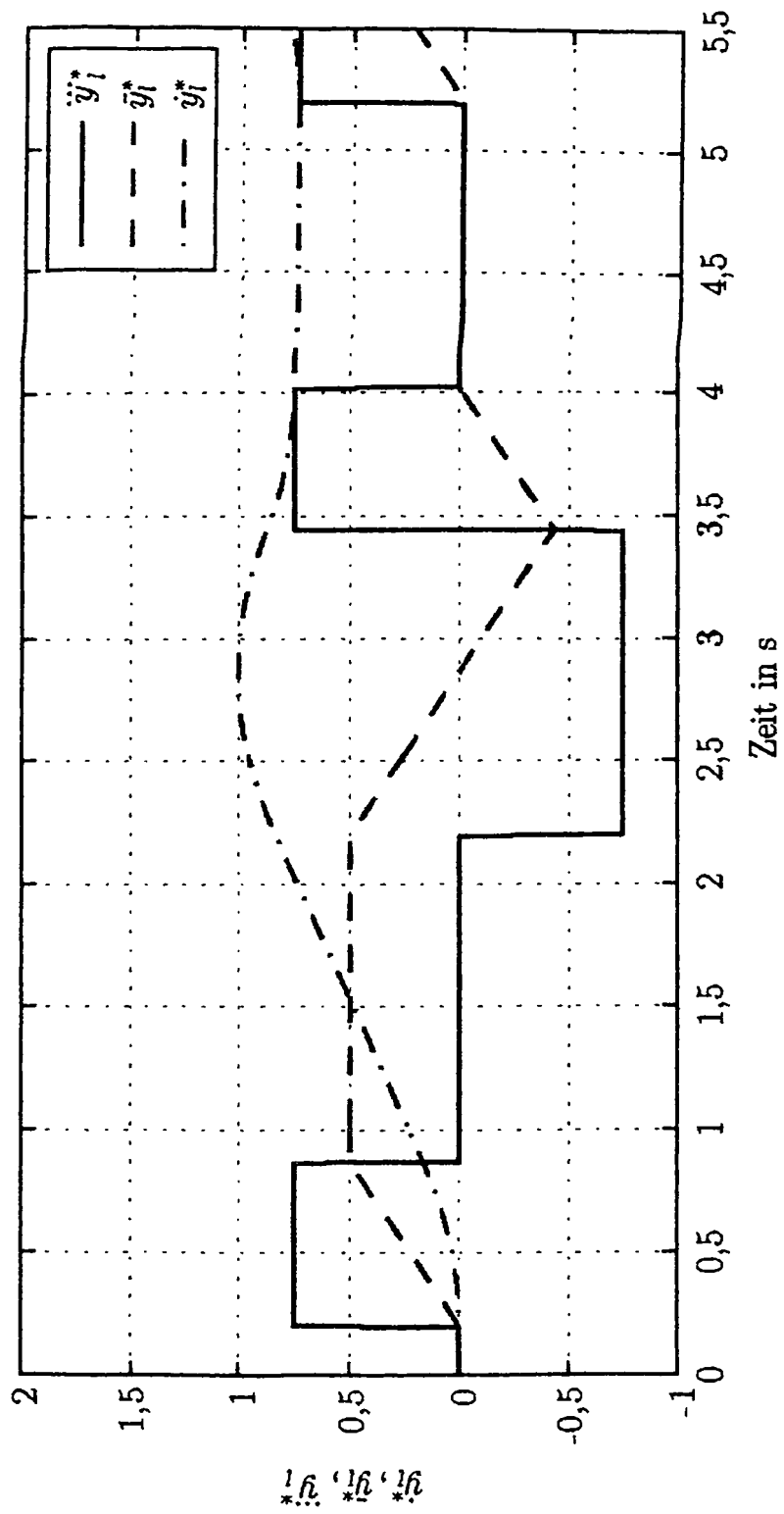


Fig. 8:

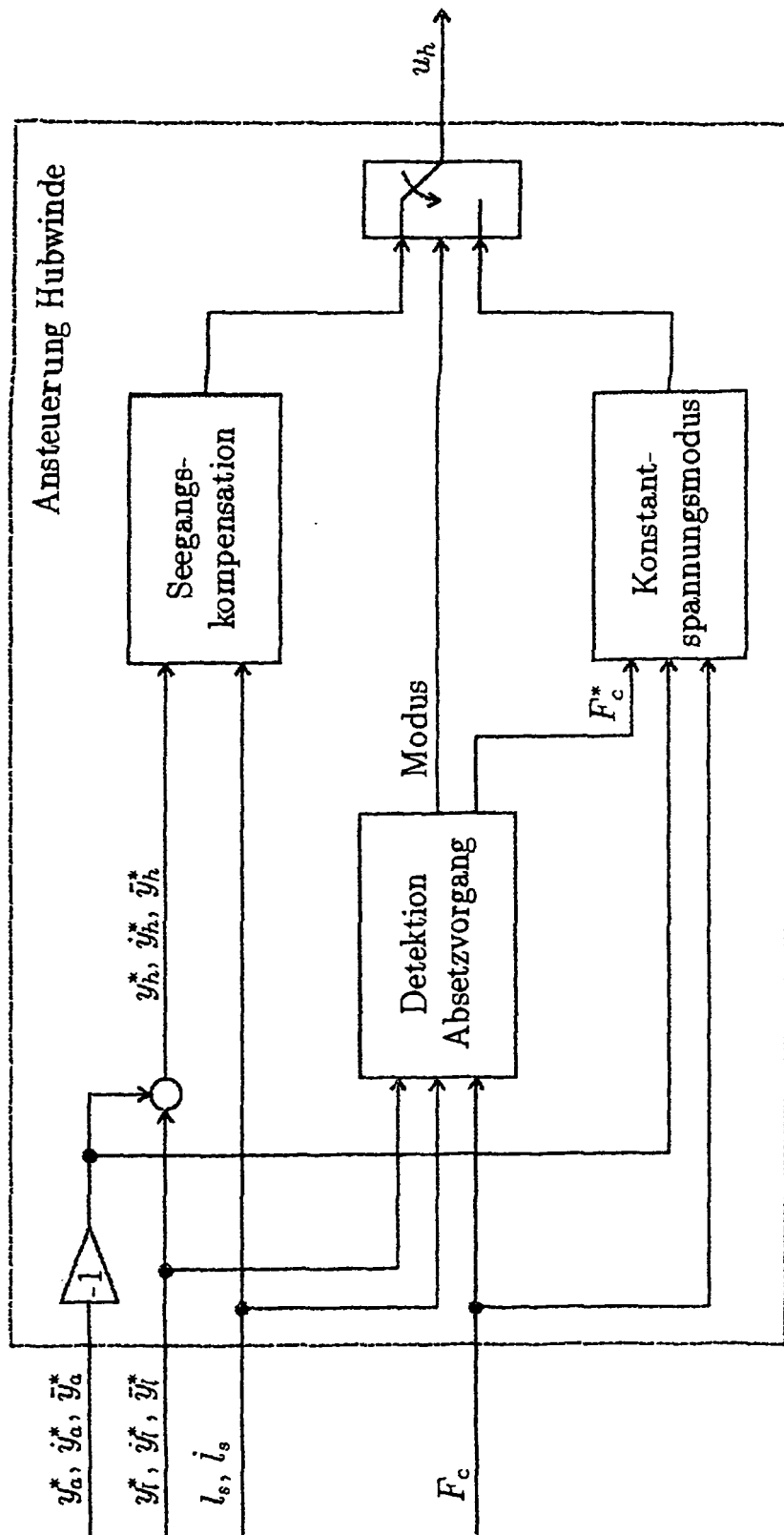


Fig. 9:

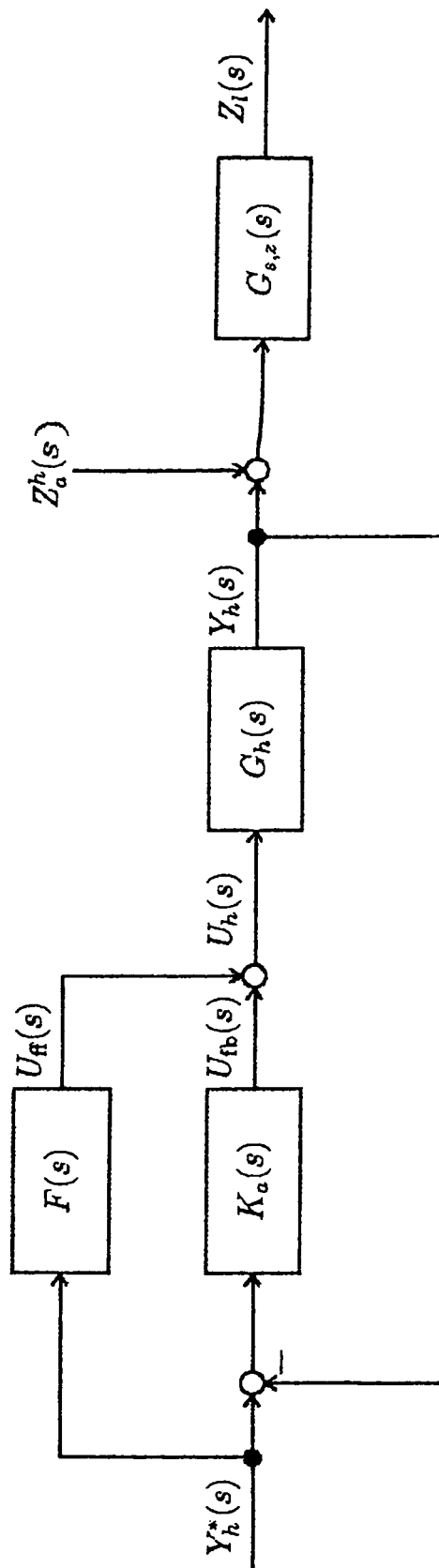


Fig. 10:

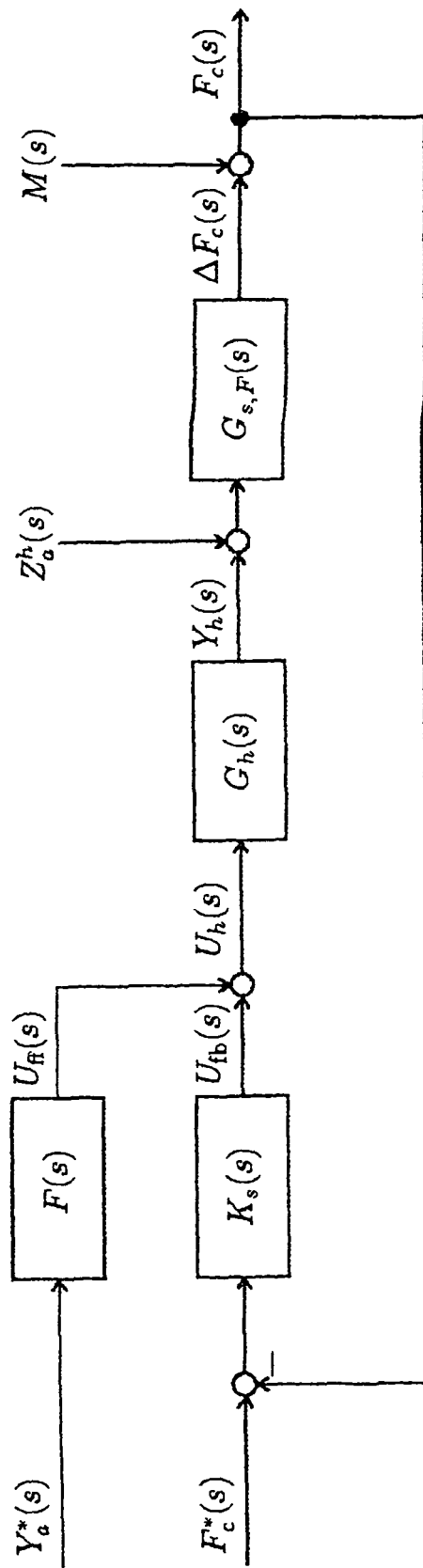


Fig. 11:

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] [0024] [0061]
- DE 102008024513 [0067] [0079]