

(19)



(11)

EP 2 272 784 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:

12.01.2011 Patentblatt 2011/02

(51) Int Cl.:

B66C 13/06 ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **10005289.3**

(22) Anmeldetag: **20.05.2010**

(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 SE SI SK SM TR**

Benannte Erstreckungsstaaten:

BA ME RS

(30) Priorität: **08.07.2009 DE 102009032267**

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

(72) Erfinder:

- **Schneider, Klaus, Dr. Dipl.-Ing.
88145 Hergatz (DE)**

• **Sawodny, Oliver, Prof. Dr.-Ing.
70186 Stuttgart (DE)**

• **Neupert, Jörg
70499 Stuttgart (DE)**

• **Arnold, Eckhard
98693 Ilmenau (DE)**

• **Knierim, Karl Lukas
70197 Stuttgart (DE)**

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

(54) **Kran zum Umschlagen einer an einem Lastseil hängenden Last**

(57) Die vorliegende Erfindung betrifft einen Kran zum Umschlagen einer an einem Lastseil hängenden Last mit einem Drehwerk zum Drehen des Kranes, einem Wippwerk zum Aufwippen des Auslegers und einem Hubwerk zum Senken bzw. Heben der am Lastseil hängenden Last, mit einer Steuereinheit zur Berechnung der

Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk, wobei die Berechnung der Ansteuerbefehle zur Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk auf Grundlage einer in kartesischen Koordinaten angegebenen Soll-Bewegung der Last erfolgt.

EP 2 272 784 A1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen Kran zum Umschlagen einer an einem Lastseil hängenden Last mit einem Drehwerk zum Drehen des Krans, einem Wippwerk zum Aufwippen des Auslegers und einem Hubwerk zum Senken bzw. Heben der am Lastseil hängenden Last. Der Kran weist dabei eine Steuereinheit zur Berechnung der Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk auf. Vorteilhafterweise umfasst die Steuereinheit dabei eine Lastpendeldämpfung, welche durch geeignete Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk ein Pendeln der Last bei einer Bewegung des Krans dämpft.

[0002] Ein derartiger Kran ist beispielsweise aus DE 100 64 182 bekannt. Dabei erfolgt die Eingabe der Steuerbefehle, die Erzeugung der Soll-Trajektorien sowie die Berechnung der Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und Hubwerk in Zylinderkoordinaten. Die Berechnung der geeigneten Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk zur Lastpendeldämpfung ist dabei aufwendig und relativ ungenau.

[0003] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen Kran zum Umschlagen einer an einem Lastseil hängenden Last mit einer verbesserten Kransteuerung zur Verfügung zu stellen.

[0004] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß von einem Kran gemäß Anspruch 1 gelöst. Der erfindungsgemäße Kran umfasst dabei ein Drehwerk zum Drehen des Krans, ein Wippwerk zum Aufwippen des Auslegers und ein Hubwerk zum Senken bzw. Heben der am Lastseil hängenden Last. Der Kran weist dabei eine Kransteuerung mit einer Steuereinheit zur Berechnung der Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk auf. Vorteilhafterweise umfasst die Steuereinheit dabei eine Lastpendeldämpfung. Erfindungsgemäß ist die Steuereinheit so ausgeführt, dass die Berechnung der Steuerbefehle zur Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk auf Grundlage einer in kartesischen Koordinaten angegebenen Soll-Bewegung der Last erfolgt. Dies hat den Vorteil, dass die Berechnung auf Grundlage der Sollbewegung in kartesischen Koordinaten erheblich vereinfacht und verbessert wird. Insbesondere ist auf Grundlage der Sollbewegung der Last in kartesischen Koordinaten eine einfachere bzw. effektivere Lastpendeldämpfung realisierbar.

[0005] Vorteilhafterweise beruht die Lastpendeldämpfung der Steuereinheit dabei auf der Invertierung eines physikalischen Modells der am Lastseil hängenden Last und des Kranes, wobei das invertierte physikalische Modell eine vorgegebene Bewegung der am Lastseil hängenden Last in kartesischen Koordinaten in Ansteuersignale für das Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk umwandelt. Das physikalische Modell umfasst dabei die Dynamik der am Lastseil hängenden Last, insbesondere die Pendelschwingungs-Dynamik, so dass über die Invertierung des Modells eine äußerst effektive Lastpendeldämpfung realisierbar ist. Die Berechnung in kartesischen Koordinaten erlaubt dabei eine quasi-statische Entkopplung der Hubbewegung in z-Richtung von den Bewegungen in der Horizontalen, d.h. in x- und y-Richtung. Dies ermöglicht eine einfachere Invertierung des Modells.

[0006] Der erfindungsgemäße Kran umfasst vorteilhafterweise einen oder mehrere Sensoren zur Bestimmung einer oder mehrerer Messgrößen zur Position und/oder Bewegung der Last und/oder des Kranes, insbesondere zur Bestimmung einer oder mehrerer der Größen Seilwinkel radial, Seilwinkel tangential, Wippwinkel, Drehwinkel, Seillänge sowie deren Ableitungen, wobei die Messgröße oder die Messgrößen in die Invertierung des physikalischen Modells eingehen. Insbesondere gehen dabei mehrere dieser Größen, vorteilhafterweise alle dieser Größen in die Invertierung des physikalischen Modells ein. Die Rückführung der gemessenen Zustandsgrößen ermöglicht eine Invertierung des physikalischen Modells, welches ansonsten nur unter größtem Aufwand oder überhaupt nicht invertierbar wäre.

[0007] Der erfindungsgemäße Kran umfasst weiterhin vorteilhafterweise einen oder mehrere Sensoren zur Bestimmung einer oder mehrerer Messgrößen zur Position und/oder Bewegung der Last und/oder des Kranes, insbesondere zur Bestimmung einer oder mehrerer der Größen Seilwinkel radial, Seilwinkel tangential, Wippwinkel, Drehwinkel, Seillänge sowie deren Ableitungen, wobei die Messgröße oder die Messgrößen in die Steuereinheit zurückgeführt werden. Die Rückführung der gemessenen Zustandsgrößen ist dabei auch unabhängig von der Invertierung des Modells von großem Vorteil, um die Ansteuerung zu stabilisieren.

[0008] Vorteilhafterweise ist dabei eine erste Transformationseinheit vorgesehen ist, welche auf Grundlage der Messgröße oder der Messgrößen die Ist-Position und/oder Ist-Bewegung der Last in kartesischen Koordinaten berechnet, insbesondere eine oder mehrere der Größen Position in x, y und z, Geschwindigkeit in x, y und z, Beschleunigung in x und y, Ruck in x und y. Die erste Transformationseinheit erlaubt so einen Vergleich der Ist-Position und/oder Ist-Bewegung der Last mit der in kartesischen Koordinaten vorliegenden Soll-Position und/oder der Soll-Bewegung der Last. Dabei werden neben der Ist-Position der Last vorteilhafterweise die Ist-Geschwindigkeit der Last sowie ggf. höhere Ableitungen in kartesischen Koordinaten berechnet.

[0009] Die Sensorsignale entsprechen dabei Meßwerten in Krankoordinaten oder in Seilkoordinaten wie z. B. den Größen Seilwinkel radial, Seilwinkel tangential, Wippwinkel, Drehwinkel und Seillänge sowie deren Ableitungen, aus welchen durch die erste Transformationseinheit die Ist-Position und/oder Ist-Bewegung der Last in kartesischen Koordinaten berechnet wird. Der Wippwinkel und der Drehwinkel liegen dabei als Messgrößen in Krankoordinaten vor. Die Seilwinkel liegt dagegen in Seilkoordinaten vor, welche bezüglich einer vertikal vom Auslegerkopf nach unten gerichteten Achse gemessen werden. Die erste Transformationseinheit erfordert eine Transformation dieser Koordinatensysteme

in kartesischen Koordinaten der Last.

[0010] Der Kran gemäß der vorliegenden Erfindung umfasst dabei vorteilhafterweise ein oder mehrere Seilwinkelsensoren, wobei die Messwerte des oder der Seilwinkel-Sensoren in die Steuereinheit zurückgeführt werden. Die Seilwinkelsensoren ermöglichen dabei eine Rückführung der Pendelbewegung in die Steuereinheit und insbesondere in die Pendeldämpfung. Hierdurch ergibt sich ein geschlossener Regelkreislauf, durch welchen die erfindungsgemäße Steuereinheit und insbesondere die Lastpendeldämpfung stabilisiert wird.

[0011] Insbesondere berechnet die erste Transformationseinheit dabei auf Grundlage der von dem oder den Seilwinkelsensoren gemessenen Meßwerte die Ist-Position und/oder die Ist-Bewegung der Last in kartesischen Koordinaten. Dabei können neben der Ist-Position der Last auch die Ableitung der Ist-Position und gegebenenfalls weitere Ableitungen berechnet werden. Dabei können weitere Messgrößen in die Berechnung der Ist-Position und/oder Ist-Bewegung der Last eingehen. Insbesondere kann dabei als Messgrößen der Wippwinkel, der Drehwinkel und/oder die Seillänge sowie gegebenenfalls deren Ableitungen berücksichtigt werden.

[0012] Die Kransteuerung umfaßt vorteilhafterweise weiterhin eine Eingabeeinheit zur Eingabe von Steuerbefehlen durch eine Bedienperson und/oder durch ein Automatisierungssystem, wobei zwischen Eingabeeinheit und Steuereinheit eine zweite Transformationseinheit vorgesehen ist, welche auf Grundlage der Steuerbefehle die Soll-Bewegung der Last in kartesischen Koordinaten berechnet. Die Eingabe der Steuerbefehle erfolgt damit weiterhin in Krankoordinaten. Die Krankoordinaten umfassen dabei vorteilhafterweise den Drehwinkel des Krans, den Wippwinkel des Auslegers bzw. die Ausladung sowie die Hubhöhe. Diese Koordinaten stellen das natürliche Koordinatensystem des erfindungsgemäßen Krans dar, so dass eine Eingabe der Steuerbefehle in diesen Koordinaten intuitiv möglich ist. Die zweite Transformationseinheit transformiert daher eine Sollbewegung der Last in Krankoordinaten in eine Sollbewegung der Last in kartesischen Koordinaten.

[0013] Alternativ ist jedoch auch eine Eingabe der Soll-Bewegung der Last in kartesischen Koordinaten möglich. Insbesondere wenn der Kran über eine Fernsteuerung angesteuert wird, kann eine Eingabe in kartesischen Koordinaten einfacher für die Bedienperson sein, insbesondere wenn sie sich z.B. am Hubort aufhält. Die zweite Transformationseinheit kann so entfallen.

[0014] Weiterhin vorteilhafterweise weist der erfindungsgemäße Kran einen oder mehrere Sensoren zur Bestimmung von Messgrößen bezüglich der Position und/oder Bewegung Krans auf, insbesondere zur Bestimmung des Wippwinkels und/oder des Drehwinkels, wobei die zweite Transformationseinheit anhand der Messgröße oder der Messgrößen initialisiert wird. Hierdurch wird sichergestellt, dass eine korrekte Transformation der Krankoordinaten in kartesische Koordinaten erfolgt. Die Initialisierung der zweiten Transformationseinheit anhand der Messgröße bzw. Messgrößen kann dabei z. B. jeweils bei Einschalten der Kransteuerung erfolgen.

[0015] Die Kransteuerung des erfindungsgemäßen Krans umfasst weiterhin vorteilhafterweise ein Bahnplanmodul, welches aus den Steuerbefehlen der Eingabeeinheit Trajektorien generiert, die als Eingangsgrößen für die Steuereinheit dienen. Das Bahnplanmodul berechnet daher aus den Steuerbefehlen, welche von einer Bedienperson eingegeben werden, eine Sollbewegung der Last.

[0016] Vorteilhafterweise werden dabei die Trajektorien in Krankoordinaten generiert, so dass die zweite Transformationseinheit zwischen Bahnplanmodul und Steuereinheit angeordnet ist. Die Krankoordinaten sind dabei vorteilhafterweise die Zylinderkoordinaten des Krans, d. h. der Drehwinkel, der Wippwinkel bzw. die Ausladung sowie die Hubhöhe. In diesen Koordinaten ist die Generierung der Trajektorien besonders einfach, da auch die Systembeschränkungen in diesen Koordinaten vorliegen.

[0017] Vorteilhafterweise werden dabei die Trajektorien im Bahnplanmodul unter Berücksichtigung der Systembeschränkungen optimal aus den Steuerbefehlen generiert.

[0018] Vorteilhafterweise berücksichtigt die Steuereinheit weiterhin die Dynamik der am Lastseil hängenden Last, um Schwingungen der Last zu dämpfen. Dies kann insbesondere in der Lastpendeldämpfung der Steuereinheit erfolgen, um Pendelschwingungen der Last zu dämpfen. Zusätzlich können gegebenenfalls auch Schwingungen der Last in Hubrichtung berücksichtigt und gedämpft werden.

[0019] Vorteilhafterweise beruht die Steuereinheit auf der Invertierung eines physikalischen Modells der am Lastseil hängenden Last und des Krans. Das physikalische Modell beschreibt dabei vorteilhafterweise die Bewegung der Last in Abhängigkeit von der Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk. Durch die Invertierung des Modells ergibt sich so die Ansteuerung der jeweiligen Werke auf Grundlage einer Solltrajektorie der Last.

[0020] Das Modell berücksichtigt dabei vorteilhafterweise die Schwingungs-Dynamik der am Lastseil hängenden Last. Hierdurch ergibt sich eine effektive Dämpfung von Schwingungen der Last, insbesondere eine effektive Lastpendeldämpfung. Zudem kann die Steuereinheit einfach an unterschiedliche Krane angepasst werden.

[0021] Vorteilhafterweise ist das physikalische Modell dabei nicht-linear. Dies ist von Bedeutung, da viele der entscheidenden Effekte bei der Lastpendeldämpfung nichtlinearer Natur sind.

[0022] Vorteilhafterweise erlaubt das Modell dabei in kartesischen Koordinaten eine quasi-statische Entkopplung der vertikalen Bewegung der Last. Durch diese quasi-statische Entkopplung der vertikalen Bewegung der Last in Hubrichtung von der Bewegung der Last in horizontalen Richtungen wird eine vereinfachte und verbesserte Berechnung der An-

steuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk möglich. Insbesondere erlaubt dies eine einfachere Lastpendeldämpfung.

[0023] Die quasi-statische Entkopplung der vertikalen Bewegung der Last ermöglicht es zudem, die vertikale Bewegung der Last direkt anzusteuern, während die horizontale Bewegung über die Lastpendeldämpfung angesteuert wird.

[0024] Bei dem erfindungsgemäßen Kran kann daher vorgesehen sein, dass die Steuereinheit das Hubwerk direkt anhand von Steuerbefehlen einer Bedienperson und/oder eines Automatisierungssystems ansteuert, während die Ansteuerung des Drehwerks und des Wippwerks über die Lastpendeldämpfung erfolgt. Hierdurch lässt sich das erfindungsgemäße Steuerungssystem einfacher und kostengünstiger realisieren. Zudem werden höhere Sicherheitsstandards erfüllt, da an die Hubbewegung andere Anforderungen bezüglich der Sicherheit gestellt werden als an die Bewegung der Last in horizontaler Richtung. Die Bedienperson und/oder das Automatisierungssystem kann daher erfindungsgemäß die Geschwindigkeit des Hubwerks direkt ansteuern, während für die Ansteuerung des Drehwerks und des Wippwerks aus den Eingaben der Bedienperson und/oder des Automatisierungssystems zunächst eine Soll-Bewegung der Last generiert wird, aus welcher die Lastpendeldämpfung eine Ansteuerung des Hubwerks und des Wippwerks berechnet, welche Lastpendelschwingungen vermeidet bzw. dämpft.

[0025] Bei den Antrieben des erfindungsgemäßen Krans kann es sich z. B. um hydraulische Antriebe handeln. Ebenso ist der Einsatz von elektrischen Antrieben möglich. Das Wippwerk kann z. B. über einen Hydraulikzylinder realisiert werden, oder über ein Einziehwerk, welches den Ausleger über eine Verseilung bewegt.

[0026] Die vorliegende Erfindung umfasst neben dem Kran weiterhin eine Kransteuerung zur Ansteuerung des Drehwerks, des Wippwerks und/oder des Hubwerks eines Krans. Die Kransteuerung weist dabei eine Steuereinheit zur Berechnung der Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk auf. Die Steuereinheit weist vorteilhafterweise weiterhin eine Lastpendeldämpfung auf. Erfindungsgemäß ist die Steuereinheit dabei so ausgeführt, dass die Berechnung der Ansteuerbefehle zur Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk auf Grundlage einer in kartesischen Koordinaten angegebenen Soll-Lastbewegung erfolgt.

[0027] Die Kransteuerung ist dabei vorteilhafterweise so ausgeführt, wie dies bereits oben bezüglich des Krans dargestellt wurde. Vorteilhafterweise handelt es sich bei der Kransteuerung dabei um eine computer-implementierte Kransteuerung.

[0028] Die vorliegende Erfindung umfasst weiterhin ein entsprechendes Verfahren zur Ansteuerung eines Krans.

[0029] Insbesondere umfasst die vorliegende Erfindung dabei ein Verfahren zur Ansteuerung eines Krans zum Umschlagen einer an einem Lastseil hängenden Last mit einem Drehwerk zum Drehen des Krans, einem Wippwerk zum Aufwippen des Auslegers und einem Hubwerk zum Senken bzw. Heben der am Seil hängenden Last, wobei die Berechnung der Ansteuerbefehle zur Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk auf Grundlage einer in kartesischen Koordinaten angegebenen Solllastbewegung erfolgt. Wie bereits bezüglich des Krans dargestellt, ermöglicht die Berechnung der Ansteuerbefehle auf Grundlage einer in kartesischen Koordinaten angegebenen Solllastbewegung eine vereinfachte und verbesserte Ansteuerung. Insbesondere kann dabei bei der Berechnung der Ansteuerbefehle zur Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk eine Lastpendeldämpfung vorgenommen werden, durch welche Pendelbewegungen der Last gedämpft werden. Die Lastpendeldämpfung erfolgt dabei vorteilhafterweise unter Berücksichtigung der Dynamik der am Lastseil hängenden Last, insbesondere unter Berücksichtigung der Pendeldynamik der am Lastseil hängenden Last, um sphärische Pendelschwingungen der Last durch eine geeignete Ansteuerung von Drehwerk und Wippwerk zu dämpfen.

[0030] Vorteilhafterweise erfolgt das Verfahren dabei in gleicher Weise wie dies oben bezüglich des Krans bzw. der Kransteuerung näher dargestellt wurde. Insbesondere handelt es sich bei dem erfindungsgemäßen Verfahren dabei um ein Verfahren zur Ansteuerung eines Krans, wie er oben dargestellt wurde.

[0031] Die vorliegende Erfindung wird nun anhand eines Ausführungsbeispiels sowie Zeichnungen näher dargestellt. Dabei zeigen:

Figur 1: die Struktur des zur Ansteuerung herangezogenen physikalischen Modells,

Figur 2: eine Prinzipdarstellung des Krans sowie der am Lastseil hängenden Last unter Angabe der relevanten Koordinaten,

Figur 3: eine Prinzipdarstellung der Steuerungsstruktur einer erfindungsgemäßen Kransteuerung,

Figur 4: einen Ausschnitt aus der erfindungsgemäßen Steuerungsstruktur, welche die Rückführung von Meßwerten anhand einer zweiten Transformationseinheit näher darstellt,

Figur 5: die maximale Geschwindigkeit des Auslegerkopfes in radialer Richtung in Abhängigkeit von der Ausladung des Auslegers,

Figur 6: die radiale Position der Last bei einer Wippbewegung des Auslegers,

Figur 7: die entsprechende Position der Last in x- bzw. y-Richtung während der Wippbewegung,

5 Figur 8: die Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Last in Drehrichtung während einer Drehbewegung des Krans,

Figur 9: die Position der Last in radialer Richtung während der Drehbewegung des Krans und

10 Figur 10: die entsprechende Position der Last in x- und γ -Richtung während der Drehbewegung des Krans.

[0032] Ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Kranes, eines Verfahrens zum Steuern des Krans und einer entsprechenden Kransteuerung, in welcher dieses Verfahren implementiert ist, wird nun im folgenden näher dargestellt.

15 **[0033]** Die wesentlichen Steueraufgaben bei der Automatisierung des Kranbetriebs gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Steuern eines Krans sind Lastpendeldämpfung und Lastgeschwindigkeitsfolgeregelung. Hierzu wird ein nichtlineares dynamisches Kranmodell eingesetzt, welches die Bewegungsgleichungen der seilgeführten Last und die vereinfachte Antriebsdynamik kombiniert. Basierend auf der Flachheitseigenschaft des Kranmodells erhält man ein linearisierendes Steuergesetz durch eine Zustandsrückführung. Die Generierung von glatten und realisierbaren Referenztrajektorien wird als Optimalsteuerungsproblem formuliert. Das Regelungssystem wird in die Software eines Krans, insbesondere eines Hafenmobilkrans integriert.

20 **[0034]** Die wesentlichen Ziele der Kranautomatisierung gemäß der vorliegenden Erfindung sind dabei die Erhöhung der Effektivität und der Sicherheit bei Verladeprozessen. Der Kranbetrieb sowie externe Störungen bewirken schwach gedämpfte Lastpendelbewegungen. Ein weiteres Problem bei der Steuerung von Drehkränen verglichen mit Portalkranen ist die nichtlineare Verkopplung der Dreh- und Wippbewegungen. Eine aktive Lastpendeldämpfung und eine präzise Folge der gewünschten Lastgeschwindigkeiten, die durch die Handhebelsignale des Bedieners vorgegeben werden, sind die wesentlichen Regelungsaufgaben für den Hafenmobilkran.

25 **[0035]** Das Problem der Trajektorienfolge wird durch Ableiten von Steuergesetzen gelöst, die das nichtlineare Kransystem beruhend auf der Zustandsinformation (Linearisierung durch Zustandsrückführung) linearisieren. Bei der Auslegung der Regelung wird die Flachheitseigenschaft des MIMO-Systems nachgewiesen und verwendet. Das sich ergebende linearisierte System wird zusätzlich durch asymptotische Ausgangsregelungen stabilisiert. Aufgrund der modellbasierten Reglerauslegung sind alle Parameter analytisch wiedergegeben, und das Regelungskonzept kann problemlos an verschiedene Konfigurationen und Krantypen angepasst werden.

30 **[0036]** Die Anwendung der modellbasierten, nichtlinearen Entwurfsverfahren erfordert hinreichend glatte Referenztrajektorien, die bezüglich der Eingangs- und Zustandsbeschränkungen des Systems realisierbar sind. Daher wird das Folgeproblem als Optimalsteuerungsproblem formuliert, das online gelöst wird, um die realisierbaren Referenztrajektorien für das exakt linearisierte System zu generieren. Die Trajektoriengenerierung kann als modellprädiktive Regelung (MPC, kurz vom engl. Model Predictive Control) betrachtet werden. Die Formulierung des Problems der optimalen Steuerung in den flachen Koordinaten reduziert den Aufwand bei der numerischen Lösung.

35 **[0037]** In dem folgenden Abschnitt wird ein dynamisches Modell des Krans aus den Bewegungsgleichungen der an einem Seil hängenden Last und aus Näherungen der Antriebsdynamik hergeleitet. Anschließend wird die differentielle Flachheit des Kranmodells gezeigt und ein nichtlineares flachheitsbasiertes Steuergesetz wird abgeleitet. Die Formulierung und numerische Lösung des Problems der Trajektoriengenerierung als Optimalsteuerungsproblem wird aufgezeigt. Die Messergebnisse aus der Umsetzung der Regelungsstrategie an einem Hafenmobilkran werden in dem letzten Abschnitt dargestellt.

Dynamisches Kranmodell

40 **[0038]** Die vorliegende Erfindung wird bei einem Kran mit einem Ausleger 1 eingesetzt, der um eine horizontale Wippachse aufwippbar am Turm 2 des Krans angelenkt ist. Zum Aufwippen des Auslegers 1 ist dabei ein Auslegerzylinder zwischen dem Turm und dem Ausleger angeordnet. Der Turm ist um eine vertikale Drehachse drehbar. Hierzu ist der Turm auf einem Oberwagen angeordnet, welcher über ein Drehwerk bezüglich eines Unterwagens um die vertikale Drehachse drehbar ist. Am Oberwagen ist weiterhin das Hubwerk zum Anheben der Last angeordnet. Dabei ist das Hubseil von der am Oberwagen angeordneten Hubwinde über Umlenkrollen an der Turmspitze und an der Auslegerspitze 3 zur Last geführt. Der Unterwagen weist in dem Ausführungsbeispiel ein Fahrwerk auf, so dass der Kran verfahrbar ist. Dabei handelt es sich bei dem Ausführungsbeispiel um einen Hafenmobilkran. Dieser hat z. B. eine Ladefähigkeit von bis zu 200 t, eine maximale Ausladung von 60 m und eine Seillänge von bis zu 80 m.

45 **[0039]** Das dynamische Modell des Auslegerkrans wird durch Unterteilen des Gesamtsystems in zwei Subsysteme

abgeleitet, siehe Fig. 1. Das erste Subsystem ist die starre Kranstruktur 5, die aus dem Kranturm 2 und dem Ausleger 1 besteht. Dieses Submodell weist zwei Freiheitsgrade auf. Den Drehwinkel φ_s und den Aufrichtwinkel φ_l . Das zweite Subsystem 6 stellt die an dem Seil hängende Last dar. Der Aufhängungspunkt ist die Spitze des Auslegers. Wie in Fig. 1 gezeigt, wirkt Kranstruktur auf die seilgeführte Last durch Bewegungen der Auslegerspitze, was zu sphärischen Lastpendelbewegungen führt. Das physikalische Modell der Kranstruktur beschreibt dabei anhand der Eingangssignale 7 für die Antriebe die Bewegung 8 der Auslegerspitze, das physikalische Modell der am Kranseil hängenden Last beschreibt anhand der Bewegung 8 der Auslegerspitze die Bewegung der Last 9, wobei da Modell Pendelbewegungen der Last berücksichtigt.

Dynamik der Kranstruktur

[0040] Die Kranstruktur wird durch Hydraulikmotoren für die Drehbewegung und einen Hydraulikzylinder für das Wippen des Auslegers in Bewegung versetzt. Unter der Annahme, dass die Hydraulikpumpe ein Verzögerungsverhalten erster Ordnung aufweist und die Drehgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_s$ proportional zu dem von der Pumpe gelieferten Ölstrom ist, ergibt sich die Bewegungsgleichung für das Drehen zu

$$\ddot{\varphi}_s + \frac{1}{T_s} \dot{\varphi}_s = \underbrace{\frac{2\pi K_s}{i_s V T_s}}_d u_s \quad (1)$$

[0041] Die Parameter von Gleichung (1) sind die Zeitkonstante T_s , die Proportionalkonstante K_s zwischen dem Eingangssignal u_s und dem Öldurchsatz, das Übertragungsverhältnis i_s und das Motorvolumen V . Die Ableitung des dynamischen Modells der Wippbewegung beruht erneut auf der Annahme des Verzögerungsverhaltens erster Ordnung zwischen dem Eingangssignal u_l und dem Durchsatz der Pumpe. Die Dynamik des Hydraulikzylinders kann vernachlässigt werden, doch muss die Aktorkinematik berücksichtigt werden. Die sich ergebende Bewegungsgleichung lautet:

$$\ddot{\varphi}_l + \frac{1}{T_l} \dot{\varphi}_l - \underbrace{\frac{C_2}{C_1^2}}_e \dot{\varphi}_l^2 = \underbrace{\frac{K_l C_1}{T_l A}}_k u_l \quad (2)$$

mit der Zeitkonstante T_l , der Proportionalkonstante K_l , der Querschnittfläche A und den geometrischen Konstanten C_1 und C_2 .

Dynamik der am Seil hängenden Last

[0042] Das zweite Subsystem stellt ein an der Auslegerspitze angebrachtes sphärisches Pendel dar. Pendelbewegungen können entweder durch Bewegungen der Kranstruktur (erstes Subsystem) oder durch externe Kräfte ausgelöst werden. Wie in Fig. 2 gezeigt, hängt die Lastposition im Verhältnis zur Auslegerspitze von den Cardanischen Seilwinkeln φ_l und φ_r sowie der Seillänge l_R ab. Um die Bewegungsgleichungen für die am Seil hängende Last abzuleiten, wird der Euler/Lagrange-Formalismus verwendet. Wenn die generalisierten Koordinaten definiert sind als

$$\mathbf{q} = [\varphi_l \quad \varphi_r \quad l_R]^T \quad (3)$$

ergeben sich die folgenden Bewegungsgleichungen:

$$\begin{aligned} & a_0 + a_1 \ddot{\varphi}_l + a_2 \ddot{\varphi}_s + a_3 \ddot{\varphi}_l + a_4 \dot{\varphi}_s^2 + a_5 \dot{\varphi}_l^2 + a_6 \dot{\varphi}_s \dot{\varphi}_l \\ & + a_7 \dot{\varphi}_r \dot{\varphi}_s + a_8 \dot{\varphi}_l \dot{\varphi}_l + a_9 \dot{\varphi}_l \dot{l}_R + a_{10} \dot{\varphi}_s \dot{l}_R + a_{11} \dot{\varphi}_r \dot{\varphi}_l = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$b_0 + b_1 \ddot{\varphi}_r + b_2 \ddot{\varphi}_s + b_3 \ddot{\varphi}_l + b_4 \dot{\varphi}_s^2 + b_5 \dot{\varphi}_l^2 + b_6 \dot{\varphi}_s \dot{\varphi}_l + b_7 \dot{\varphi}_l \dot{\varphi}_s + b_8 \dot{\varphi}_r \dot{\varphi}_l + b_9 \dot{\varphi}_r \dot{l}_R + b_{10} \dot{\varphi}_s \dot{l}_R + b_{11} \dot{\varphi}_l^2 = 0 \quad (5)$$

$$\ddot{l} + c_1 \ddot{\varphi}_s + c_2 \ddot{\varphi}_l + c_3 \dot{\varphi}_s^2 + c_4 \dot{\varphi}_l^2 + c_5 \dot{\varphi}_s \dot{\varphi}_l + c_6 \dot{\varphi}_l \dot{\varphi}_s + c_7 \dot{\varphi}_r \dot{\varphi}_s + c_8 \dot{\varphi}_l^2 + c_9 \dot{\varphi}_r^2 - c_0 = \left(\frac{F_R}{m_L} \right) \quad (6)$$

[0043] Die Koeffizienten a_i , b_i und c_j ($0 \leq i \leq 11$, $0 \leq j \leq 9$) sind komplexe Ausdrücke, die von den Systemparametern, dem Aufrichtwinkel φ_l und den generalisierten Koordinaten (3) abhängen. Doch zeigen die Gleichungen (4) - (6) die Komplexität des dynamischen Submodells mit Kopplungstermen wie Zentrifugal- und Coriolis-Beschleunigungen. In Gleichung (6) wird ein dritter Eingang F_R , die die Kraft der Seilwinde ist, berücksichtigt. Mit der Seilwinde können die Seillänge und somit die Höhe der Last mit der Masse m_L geändert werden.

Eingangs-affine Systemdarstellung

[0044] Die beiden Subsysteme werden nun zu einem eingangs-affinen nichtlinearen System folgender Form kombiniert:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad x_0 = x(t_0) \quad (7)$$

mit dem Eingangsvektor $u = [u_s \ u_l \ F_R]^T$ und dem folgenden Zustandsvektor:

$$x = [\varphi_s \ \dot{\varphi}_s \ \varphi_l \ \dot{\varphi}_l \ \varphi_l \ \dot{\varphi}_l \ \varphi_r \ \dot{\varphi}_r \ l_R \ \dot{l}_R]^T \quad (8)$$

[0045] Mit den Bewegungsgleichungen (1), (2) und (4) - (6) erhält man die Vektorfelder f und g zu:

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{1}{T_s} x_2 \\ x_4 \\ -\frac{1}{T_l} x_4 + ex_4^2 \\ x_6 \\ f_6(x) \\ x_8 \\ f_8(x) \\ x_{10} \\ f_{10}(x) \end{bmatrix} \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{a_2}{a_1} d - \frac{a_3}{a_1} k & 0 \\ -\frac{b_2}{b_1} d - \frac{b_3}{b_1} k & 0 \\ -c_1 d - c_2 k & \frac{1}{m_L} \end{bmatrix} \quad (9)$$

wobei

$$f_6(x) = \frac{1}{a_1} \left(\frac{a_2}{T_s} x_2 + a_3 \left(\frac{1}{T_l} x_4 - e x_4^2 \right) - a_4 x_2^2 - a_5 x_4^2 \right. \\ \left. - a_6 x_2 x_4 - a_7 x_8 x_2 - a_8 x_6 x_4 - a_9 x_6 x_{10} - a_{10} x_2 x_{10} - a_{11} x_8 x_6 + a_0 \right)$$

$$f_8(x) = \frac{1}{b_1} \left(\frac{b_2}{T_s} x_2 + b_3 \left(\frac{1}{T_l} x_4 - e x_4^2 \right) - b_4 x_2^2 - b_5 x_4^2 \right. \\ \left. - b_6 x_2 x_4 - b_7 x_6 x_2 - b_8 x_8 x_4 - b_9 x_8 x_{10} - b_{10} x_2 x_{10} - b_{11} x_6^2 + b_0 \right) \quad (10)$$

$$f_{10}(x) = \frac{c_1}{T_s} x_2 + c_2 \left(\frac{1}{T_l} x_4 - e x_4^2 \right) - c_3 x_2^2 - c_4 x_4^2 \\ - (c_5 x_4 + c_6 x_6 + c_7 x_6) x_2 - c_8 x_6^2 - c_9 x_8^2 - c_0$$

[0046] Die Ausgänge des nichtlinearen Systems sind die drei Elemente der Lastposition in kartesischen Koordinaten. Somit ist der Ausgangsvektor definiert als:

$$y = r_L = [y_x y_y y_z]^T = h(x) \\ = \begin{bmatrix} \cos \varphi_s (\sin \varphi_r l_p + \cos \varphi_l l_B) - \sin \varphi_s \sin \varphi_l \cos \varphi_r l_p \\ - \sin \varphi_s (\sin \varphi_r l_p + \cos \varphi_l l_B) - \cos \varphi_s \sin \varphi_l \cos \varphi_r l_p \\ - \cos \varphi_l \cos \varphi_r l_p + \sin \varphi_l l_B + l_T \end{bmatrix} \quad (11)$$

wobei l_B , die Länge des Auslegers, l_T die Höhe des Befestigungspunkts des Auslegers und l_p die Länge des sphärischen Pendels sind. Bei dem betrachteten Kransystem hängt die Pendellänge l_p von der Seillänge l_R und von dem Aufrichtwinkel φ_l ab.

$$l_p = l_R + l_B \sin \varphi_l \quad (12)$$

Regelungskonzept

[0047] In diesem Abschnitt wird die Verwirklichung eines Pendeldämpfungs- und Trajektorienfolgekonzepts für Auslegerkrane dargestellt. Wie in Fig. 3 gezeigt, ist eine Eingabeeinheit 10 vorgesehen, durch welche eine Bedienperson Steuerbefehle eingeben kann, z. B. über Handhebel. Alternativ können die Steuerbefehle auch von einem übergeordneten Automatisierungssystem generiert werden, welches den Kran autonom ansteuert. Aus den Steuerbefehlen werden in einem Bahnplanmodul 11 Referenztrajektorien generiert. ω_l und ω_r sind die Sollgeschwindigkeiten der Last, die mit der Dreh- und Wippbewegung des Krans verknüpft sind. ω_z bezeichnet die Sollhubgeschwindigkeit der Last. Die Referenztrajektorien $y_{t,ref}$ und $y_{r,ref}$ werden basierend auf einer modellprädiktiven Regelung (MPC) 12 generiert.

[0048] Aufgrund der Tatsache, dass das Steuergesetz basierend auf dem nichtlinearen Modell (7), das in kartesischen Koordinaten vorliegt, abgeleitet wird, müssen diese Referenztrajektorien von der polaren Darstellung in die kartesische Darstellung transformiert werden. Die Transformation **P**, welche durch eine zweite Transformationseinheit 14 gemäß

der vorliegenden Erfindung implementiert wird, berücksichtigt nicht nur die Position, sondern auch Ableitungen höherer Ordnung. Die Referenztrajektorie für die Höhe der Last $y_{z,ref}$ wird aus dem Handhebelsignal ω_z durch ein integrierendes Filter 13 ausreichender Ordnung generiert. Das Steuergesetz, das aus einem linearisierenden und einem stabilisierenden Teil besteht, berechnet die Eingangssignale des Auslegerkrans. Die Berechnung erfolgt in einer Recheneinheit 15 der Steuereinheit. Die Auslegung des Steuergesetzes basiert auf einem flachheitsbasierten Ansatz.

[0049] Die Steuereinheit steuert dabei die Antriebe des Krans 20 an. Am Kran angeordnete Sensoren messen einen Zustand x des Systems aus Kran und Last, wobei die Messsignale über eine erste Transformationseinheit 16 in die Steuerung zurückgeführt werden.

Regelungsentwurf

[0050] Zunächst wird der relative Grad des Systems (7) ermittelt, um es auf seine differentielle Flachheit hin zu prüfen. Ein MIMO-System mit m Eingängen und Ausgängen weist den vektoriellen relativen Grad $r = \{r_1, \dots, r_m\}$ für alle x in der Nachbarschaft von x_0 auf, wenn:

$$(i) \quad L_{g_j} L_f^k h_i(x_0) = 0 \quad \forall 1 \leq j \leq m \quad \forall 1 \leq i \leq m \quad \forall k < r_i - 2 \quad (13)$$

$$(ii) \quad L_{g_j} L_f^{r_i-1} h_i(x_0) \neq 0 \quad \forall 1 \leq i \leq m \quad \text{für mindestens ein } j \in \{1, \dots, m\} \quad (14)$$

und (iii) die $m \times m$ Matrix:

$$R(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) & L_{g_2} L_f^{r_1-1} h_1(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ L_{g_1} L_f^{r_2-1} h_2(x) & L_{g_2} L_f^{r_2-1} h_2(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{r_2-1} h_2(x) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{r_m-1} h_m(x) & L_{g_2} L_f^{r_m-1} h_m(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{r_m-1} h_m(x) \end{bmatrix} \quad (15)$$

regulär ist, d.h. $\text{Rang } R(x_0) = m$, [5]. Mit System (7) und $m = 3$ wird die Matrix (15) erhalten als:

$$R(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\cos \varphi_s \sin \varphi_r - \sin \varphi_s \sin \varphi_t \cos \varphi_r}{m_L} \\ 0 & 0 & -\frac{\sin \varphi_s \sin \varphi_r + \cos \varphi_s \sin \varphi_t \cos \varphi_r}{m_L} \\ 0 & 0 & -\frac{\cos \varphi_{St} \cos \varphi_{Sr}}{m_L} \end{bmatrix} \quad (16)$$

[0051] Da die Matrix (16) nicht regulär ist, ist der vektorielle relative Grad r nicht wohl definiert und eine statische Entkoppelung ist nicht möglich. Aber für alle drei Ausgänge taucht nur der dritte Eingang F_R in der zweiten Ableitung auf. Somit kann eine quasi-statische Entkoppelung erreicht werden. Daher werden die zweiten Ableitungen der Ausgaben

ermittelt als:

$$\ddot{y}_x = \frac{\cos \varphi_s \sin \varphi_r - \sin \varphi_s \sin \varphi_t \cos \varphi_r}{m_L} F_R \quad (17)$$

$$\ddot{y}_y = \frac{\sin \varphi_s \sin \varphi_r + \cos \varphi_s \sin \varphi_t \cos \varphi_r}{m_L} F_R \quad (18)$$

$$\ddot{y}_z = -g - \frac{\cos \varphi_t \cos \varphi_r}{m_L} F_R \quad (19)$$

[0052] Mit Gleichung (19) ist das Steuergesetz für die Hubwinde gegeben als:

$$F_R(x, \ddot{y}_z) = \frac{-m_L}{\cos \varphi_t \cos \varphi_r} (\ddot{y}_z + g) \quad (20)$$

[0053] Durch Ersetzen der Kraft der Hubwinde F_R in Gleichung (17) und (18) durch die Beziehung in Gleichung (20) sind die zweiten Ableitungen der Ausgänge y_x und y_y unabhängig von u , hängen aber von $\ddot{y}_z$ ab. Ein weiteres Differenzieren der Ausgänge bis hinauf zu den vierten Ableitungen ergibt:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\ddot{y}}_x \\ \ddot{\ddot{y}}_y \end{bmatrix} = F(x, u_s, u_t, \ddot{y}_z, \ddot{\ddot{y}}_z, \ddot{\ddot{\ddot{y}}}_z) \quad (21)$$

[0054] Da die ersten beiden Eingänge u_s und u_t in den vierten Ableitungen der Ausgänge auftauchen, ist der vektorielle relative Grads von System (7):

$$r = \{r_x = 4, r_y = 4, r_z = 2\} \quad (22)$$

[0055] Die Summe der Elemente des vektoriellen relativen Grads ist 10, was gleich der Ordnung des Systems ist. Dies bedeutet, dass das System (7) differentiell flach ist. Das Auflösen von Gleichung (21) nach den Eingängen und das Ersetzen der Ausgänge mit den neuen Eingängen der sich ergebenden Integratorketten ergibt die folgenden Steuergesetze:

$$\begin{bmatrix} u_s \\ u_t \end{bmatrix} = F^{-1}(x, v_x, v_y, v_z, \ddot{y}_{z,ref}, \ddot{\ddot{y}}_{z,ref}) \quad (23)$$

mit

$$v_i = y_{i,ref}^{(ri)} - v_{i,stab} \quad i \in \{x, y, z\} \quad (24)$$

[0056] In Gleichung (20) ist $\ddot{y}_z$ ebenfalls durch den neuen Eingang v_z ersetzt. Doch obwohl der relative Grad von Ausgabe y_z zwei ist, muss die Referenztrajektorie $y_{z,ref}$ die dritte und vierte Ableitung der Referenzposition enthalten. Daher ist der Filter, der zum Generieren dieser Trajektorie verwendet wird, von vierter Ordnung.

[0057] Der linearisierende Teil des Reglers wird nun durch Gleichungen (20) und (23) ermittelt. Doch wird aufgrund von Modell- und Parameterunsicherheiten und äußeren Einflüssen eine stabilisierende Rückführungsschleife konstruiert.

Wie in Fig. 4 gezeigt, werden die Differenzen zwischen den Referenztrajektorien $\tilde{y}_{i,ref} = \begin{bmatrix} y_{i,ref} & \dots & y_{i,ref}^{(r_i-1)} \end{bmatrix}$ und

den entsprechenden Zuständen der sich ergebenden entkoppelten Integratorketten $\tilde{y}_i = \begin{bmatrix} y_i & \dots & y_i^{(r_i-1)} \end{bmatrix}$ mittels

der Rückführmatrizen K_i ($i \in \{x, y, z\}$) in der Stabilisierung 17 zurückgeführt. Somit sind die stabilisierenden Teile der neuen Eingänge gegeben durch:

$$v_{i,stab} = K_i (\tilde{y}_{i,ref} - \tilde{y}_i) \quad i \in \{x, y, z\} \quad (25)$$

[0058] Die Elemente der Rückführmatrizen werden durch Polvorgabe bestimmt. Die Pole werden durch Lookup-Tabellen, die von der Seillänge abhängen, an die Systemdynamik angepasst. Die Ausgangsvektoren $\tilde{y}_i$ werden durch die Transformation $T(x)$ ermittelt. Diese Transformation $T(x)$ wird durch die erste Transformationseinheit 16 gemäß der vorliegenden Erfindung implementiert. Die Transformation beruht dabei auf der Byrnes/Isidori-Normalformdarstellung.

Trajektoriangenerierung

[0059] Die Grundidee ist das Formulieren des Problems der Trajektoriengenerierung als beschränktes Optimalsteuerungsproblem mit finitem Horizont (offener Schleife) für die Integratorketten. Die Eingänge dieser Integratorketten bilden die formalen Regelgrößen für das Optimalsteuerungsproblem. Da die Beschränkungen des Systems als einfache Grenzen in polaren Koordinaten (y_t, y_r) gegeben sind, wird das Optimalsteuerungsproblem in den Variablen $\tilde{y}_{t,ref}, \tilde{y}_{r,ref}$ formuliert. Die Transformation P durch die zweite Transformationseinheit wird anschließend vorgenommen, um die optimalen Referenztrajektorien in kartesische Koordinaten $\tilde{y}_{x,ref}, \tilde{y}_{y,ref}$ umzuwandeln.

[0060] Das Problem der optimalen Steuerung wird numerisch gelöst. Im Sinne einer modellprädiktiven Regelung wird die Lösungsprozedur im nächsten Abtastschritt mit verschobenem Horizont wiederholt, um sich ändernde Vorgaben (Sollgeschwindigkeiten der Last ω_t, ω_r) zu berücksichtigen.

[0061] Der modellprädiktive Trajektoriengenerierungsalgorithmus behandelt Beschränkungen der Systemvariablen wie Beschränkungen des Optimalsteuerungsproblems. Beschränkungen ergeben sich aus dem begrenzten Arbeitsraum des Krans, der durch die Mindest- und Höchstausladung gegeben ist. Zudem ergeben sich Beschränkungen der radialen Geschwindigkeit/Beschleunigung und Winkelgeschwindigkeit/-beschleunigung für die Auslegerspitze aus Einschränkungen der Hydraulikaktoren. Die maximale radiale Geschwindigkeit der Auslegerspitze hängt wie in Fig. 5 gezeigt aufgrund der Zylinderkinematik und von Sicherheitsgründen von der Ausladung ab. Die Beschränkungen für die Auslegerspitze werden bei dem Optimalsteuerungsproblem als Beschränkungen der Lastbewegung in der jeweiligen Richtung ausgelegt.

$$\begin{bmatrix} y_{r,ref,min} \\ -\dot{y}_{r,ref,max}(y_r) \\ -\ddot{y}_{r,ref,max} \\ -\dot{y}_{t,ref,max} \\ -\ddot{y}_{t,ref,max} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} y_{r,ref} \\ \dot{y}_{r,ref} \\ \ddot{y}_{r,ref} \\ \dot{y}_{t,ref} \\ \ddot{y}_{t,ref} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} y_{r,ref,max} \\ \dot{y}_{r,ref,max}(y_r) \\ \ddot{y}_{r,ref,max} \\ \dot{y}_{t,ref,max} \\ \ddot{y}_{t,ref,max} \end{bmatrix} \quad (26)$$

[0062] Die maximale radiale Geschwindigkeit, die wie in Fig. 5 gezeigt von der Ausladung abhängt, wird durch stück-

weise lineare Funktionen approximiert. Zudem werden limitierte Eingangsänderung als Beschränkung für $y_{r,ref}$ und

$y_{r,ref}$ genutzt, um hochfrequente Anregungen des Systems zu vermeiden

[0063] Eine standardmäßige quadratische Zielfunktion beurteilt die quadratische Abweichung der Winkel- und radialen Position und Geschwindigkeit aus deren Referenzprognosen sowie die Änderungsrate der Eingangsvariablen über den finiten Zeithorizont $[t_0, t_f]$. Der Optimierungshorizont ist ein Einstellungsparameter und sollte die wesentliche Dynamik des Systems abdecken, die durch die Periodendauer des Lastpendelns festgelegt wird. Referenzprognosen werden aus den Handhebelsignalen des Kranführers für die Solllastgeschwindigkeit in tangentialer und radialer Richtung generiert (ω_t, ω_r).

[0064] Das kontinuierliche, beschränkte, linear-quadratische Optimalsteuerungsproblem wird mit K Zeitschritten diskretisiert und durch ein quadratisches Programm (QP) in den Steuerungs- und Zustandsvariablen approximiert, die durch einen standardmäßigen Interior-Point-Algorithmus gelöst werden können. Mit diesem Algorithmus wird die Struktur der Modellgleichungen in einer Riccati-artigen Vorgehensweise genutzt, um eine Lösung der Newtonschen Schrittgleichung mit $O(K)$ Operationen zu erhalten, d.h. der rechnerische Aufwand nimmt linear mit dem Prognosehorizont zu.

Messergebnisse

[0065] Das dargestellte Regelungskonzept wurde bei einem Hafenmobilkran implementiert. Wie in Fig. 6 gezeigt ist das erste Szenario eine reine Wippbewegung. Die Last wird durch das Wippen des Auslegers von einem Radius von 31 m zu einem Radius von 17 m umgesetzt. Es ist ersichtlich, dass die radiale Position der Last y_r , die der Abstand zwischen dem Kranmast und der Last in der Richtung des Auslegers ist, der Referenztrajektorie $y_{r,ref}$ sehr genau folgt. Das Folgeverhalten des geregelten Krans in kartesischen Koordinaten wird in Fig. 7 dargestellt.

[0066] Für die praktische Verwirklichung ist im Ausführungsbeispiel nur die x- und y-Richtung von Interesse. Aufgrund von Sicherheitsgründen ist es nicht vorgesehen, die z-Position der Last automatisch mit dem Steuergesetz (20) zu beeinflussen. Daher werden nur die Steuergesetze (23) an dem LHM 280 implementiert. Wie in Fig. 7 gezeigt, führt eine radiale Referenztrajektorie mit der Transformation $\mathbf{P}$ zu Referenztrajektorien in der x- und y-Richtung, wenn der Drehwinkel ϕ_s nicht null ist.

[0067] Das zweite Manöver ist eine Drehbewegung von Null auf 400° . Fig. 8 zeigt das Trajektorienfolgeverhalten für die Winkellastposition, -geschwindigkeit und -beschleunigung. Die Referenztrajektorie wird durch den MPC-Algorithmus unter Berücksichtigung der folgenden Beschränkungen generiert:

$$|\dot{y}_{t,ref}| \leq \dot{y}_{t,ref,max} = 8,0^\circ/s, \quad |\ddot{y}_{t,ref}| \leq \ddot{y}_{t,ref,max} = 0,9^\circ/s^2$$

[0068] Der linearisierende und stabilisierende Regler lässt die Last sehr genau ohne wesentliches Überschwingen dieser Referenztrajektorie folgen. Das Restlastpendeln ist ebenfalls hinreichend klein. Von spezifischer Bedeutung ist die radiale Verschiebung der Last, zu der es aufgrund von Zentrifugalkräften während einer Drehbewegung kommt. Um die Last während Drehbewegungen auf einem konstanten Radius zu belassen, wird die radiale Verschiebung durch das Wippsteuergesetz u_j kompensiert. Dadurch ist die radiale Lastposition nahezu konstant mit Fehlern zwischen der Referenztrajektorie und der gemessenen Lastposition von weniger als $\pm 0,5$ m, siehe Fig. 9.

[0069] Da das Reglerkonzept basierend auf der Flachheitseigenschaft des nichtlinearen Systems bezüglich des Ausgangsvektors in kartesischen Koordinaten ausgelegt wird, zeigt Fig. 10 die gemessene Lastposition in der x- und y-Richtung und deren Referenztrajektorien während der Drehbewegung. Die Regelgüte ist so gut wie die Güte in der Dreh- und Wipprichtung, da die kartesische Darstellung (y_x, y_y) gleichwertig mit der polaren Darstellung (y_t, y_r) ist, wobei y_t der Drehwinkel und y_r der Radius der Last sind.

Patentansprüche

1. Kran zum Umschlagen einer an einem Lastseil hängenden Last mit einem Drehwerk zum Drehen des Kranes, einem Wippwerk zum Aufwippen des Auslegers und einem Hubwerk zum Senken bzw. Heben der am Lastseil hängenden Last, mit einer Steuereinheit zur Berechnung der Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk, wobei die Steuereinheit vorteilhafterweise eine Lastpendeldämpfung aufweist, **dadurch gekennzeichnet,** **dass** die Berechnung der Ansteuerbefehle zur Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk auf Grundlage einer in kartesischen Koordinaten angegebenen Soll-Bewegung der Last erfolgt.
2. Kran nach Anspruch 1, wobei die Lastpendeldämpfung der Steuereinheit auf der Invertierung eines physikalischen Modells der am Lastseil hängenden Last und des Kranes beruht, wobei das invertierte physikalische Modell eine vorgegebene Bewegung der am Lastseil hängenden Last in kartesischen Koordinaten in Ansteuersignale für das Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk umwandelt.
3. Kran nach Anspruch 2, mit einem oder mehreren Sensoren zur Bestimmung einer oder mehrerer Messgrößen zur Position und/oder Bewegung der Last und/oder des Kranes, insbesondere zur Bestimmung einer oder mehrerer der Größen Seilwinkel radial, Seilwinkel tangential, Wippwinkel, Drehwinkel, Seillänge sowie deren Ableitungen, wobei die Messgröße oder die Messgrößen in die Invertierung des physikalischen Modells eingehen.
4. Kran nach einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einem oder mehreren Sensoren zur Bestimmung einer oder mehrerer Messgrößen zur Position und/oder Bewegung der Last und/oder des Kranes, insbesondere zur Bestimmung einer oder mehrerer der Größen Seilwinkel radial, Seilwinkel tangential, Wippwinkel, Drehwinkel, Seillänge sowie deren Ableitungen, wobei die Messgröße oder die Messgrößen in die Steuereinheit zurückgeführt werden.
5. Kran nach Anspruch 4, wobei eine erste Transformationseinheit vorgesehen ist, welche auf Grundlage der Messgröße oder der Messgrößen die Ist-Position und/oder Ist-Bewegung der Last in kartesischen Koordinaten berechnet, insbesondere eine oder mehrere der Größen Position in x, y und z, Geschwindigkeit in x, y und z, Beschleunigung in x und y, Ruck in x und y.
6. Kran nach einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einem oder mehreren Seilwinkel-Sensoren, wobei die Messwerte des oder der Seilwinkel-Sensoren in die Steuereinheit zurückgeführt werden.
7. Kran nach einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einer Eingabeeinheit zur Eingabe von Steuerbefehlen durch eine Bedienperson, wobei zwischen Eingabeeinheit und Steuereinheit eine zweite Transformationseinheit vorgesehen ist, welche auf Grundlage der Steuerbefehle die Soll-Bewegung der Last in kartesischen Koordinaten berechnet.
8. Kran nach Anspruch 7, mit einem oder mehreren Sensoren zur Bestimmung von Messgrößen bezüglich der Position und/oder Bewegung Kranes, insbesondere zur Bestimmung des Wippwinkels und/oder des Drehwinkels, wobei die zweite Transformationseinheit anhand der Messgröße oder der Messgrößen initialisiert wird.
9. Kran nach einem der vorangegangenen Ansprüche, mit einem Bahnplanmodul, welches aus Steuerbefehlen einer Bedienperson und/oder eines Automatisierungssystems Trajektorien generiert, die als Eingangsgrößen für die Steuereinheit dienen.
10. Kran nach Anspruch 9, wobei die Trajektorien in Krankoordinaten generiert werden und die zweite Transformationseinheit zwischen Bahnplanmodul und Steuereinheit angeordnet ist.
11. Kran nach Anspruch 9 oder 10, wobei die Trajektorien im Bahnplanmodul unter Berücksichtigung der Systembe-

schränkungen optimal aus den Steuerbefehlen generiert werden.

5 12. Kran nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Steuereinheit das Hubwerk direkt anhand von Steuerbefehlen einer Bedienperson und/oder eines Automatisierungssystems ansteuert, während die Ansteuerung des Drehwerks und des Wippwerks über die Lastpendeldämpfung erfolgt.

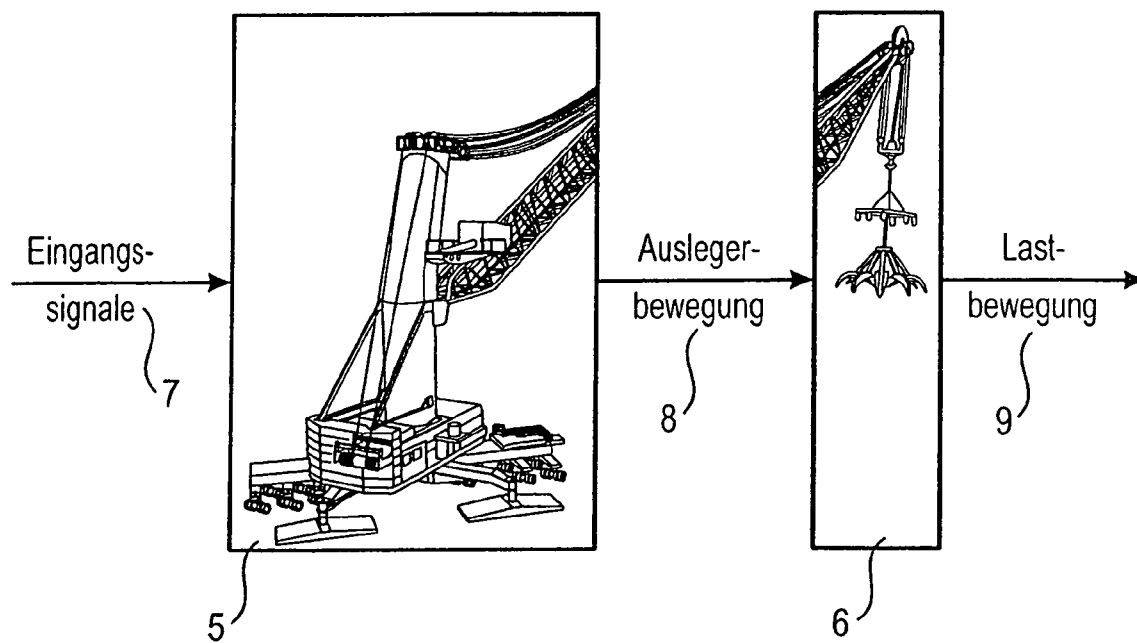
13. Kransteuerung für einen Kran nach einem der vorangegangenen Ansprüche.

10 14. Verfahren zur Ansteuerung eines Kranes zum Umschlagen einer an einem Lastseil hängenden Last mit einem Drehwerk zum Drehen des Kranes, einem Wippwerk zum Aufwippen des Auslegers und einem Hubwerk zum Senken bzw. Heben der am Seil hängenden Last,

dadurch gekennzeichnet,

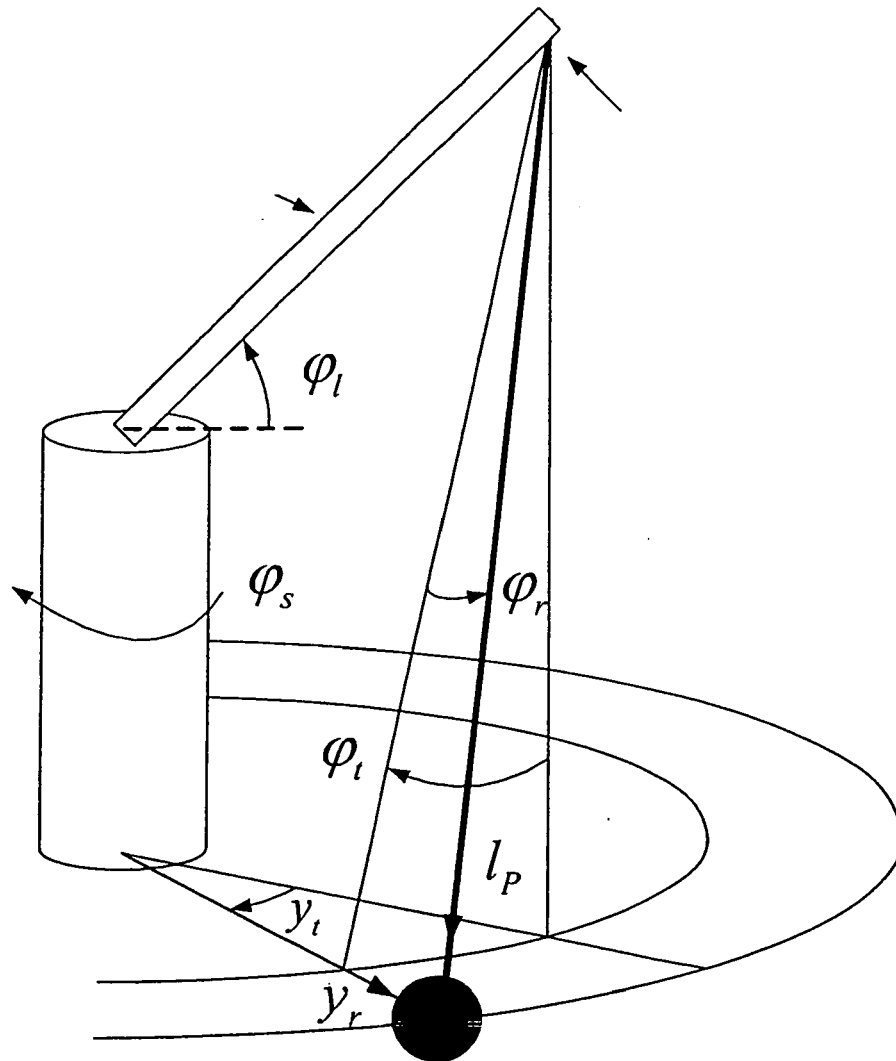
dass die Berechnung der Ansteuerbefehle zur Ansteuerung von Drehwerk, Wippwerk und/oder Hubwerk auf Grundlage einer in kartesischen Koordinaten angegebenen Soll-Lastbewegung erfolgt.

15 15. Verfahren nach Anspruch 14 zur Ansteuerung eines Kranes nach einem der Ansprüche 1 bis 12.

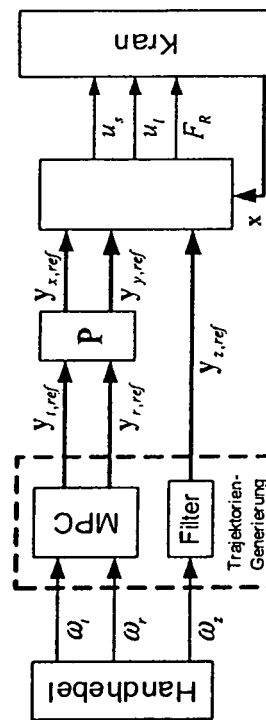


Figur 1:

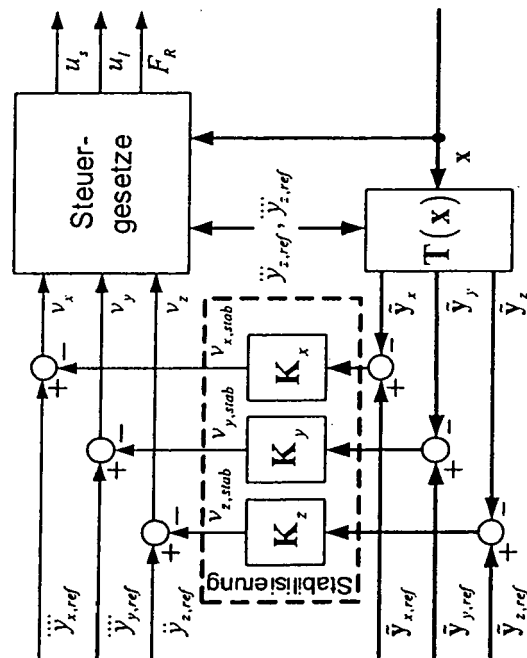
Figur 2



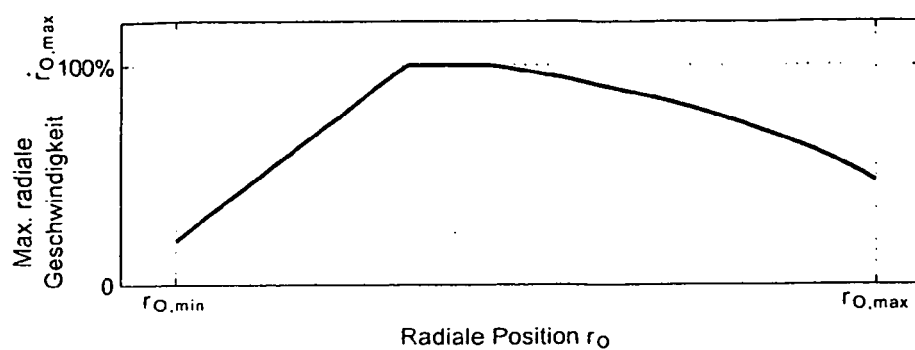
Figur 3



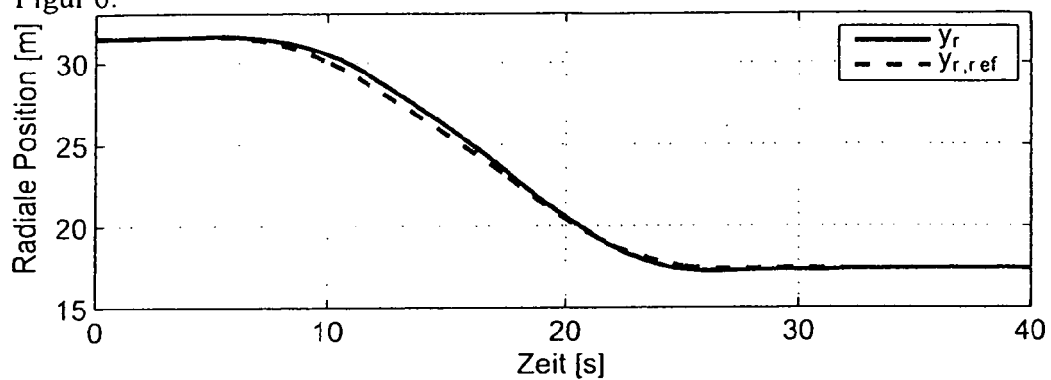
Figur 4



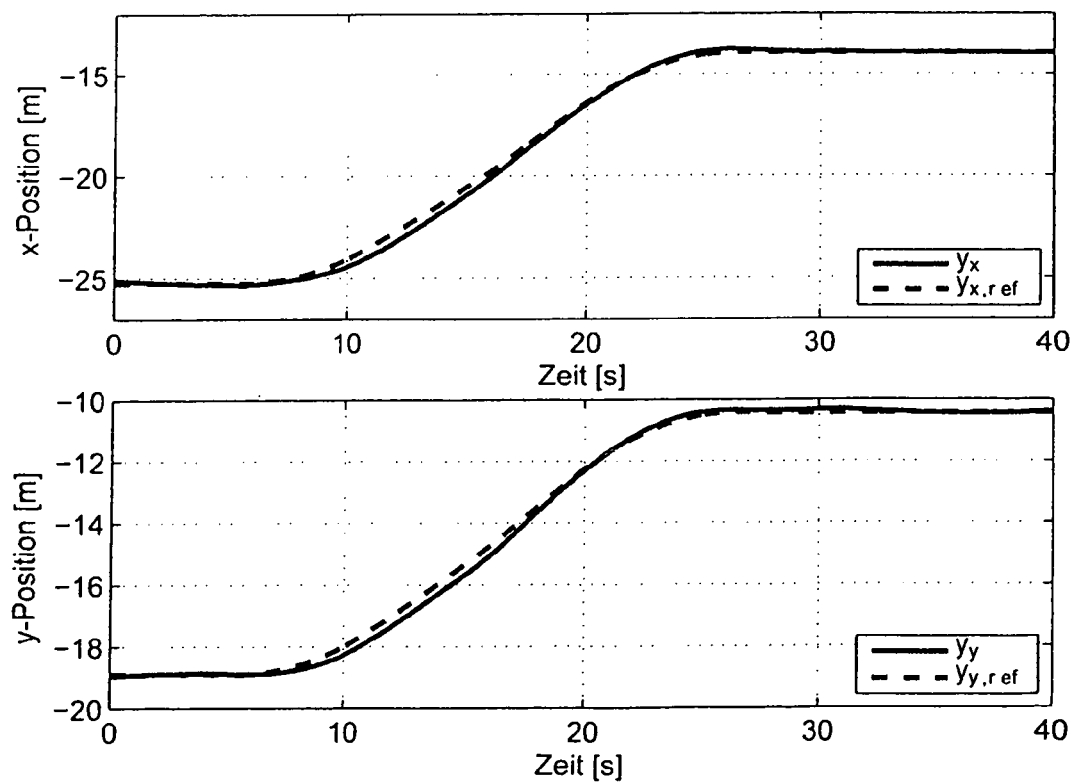
Figur 5:



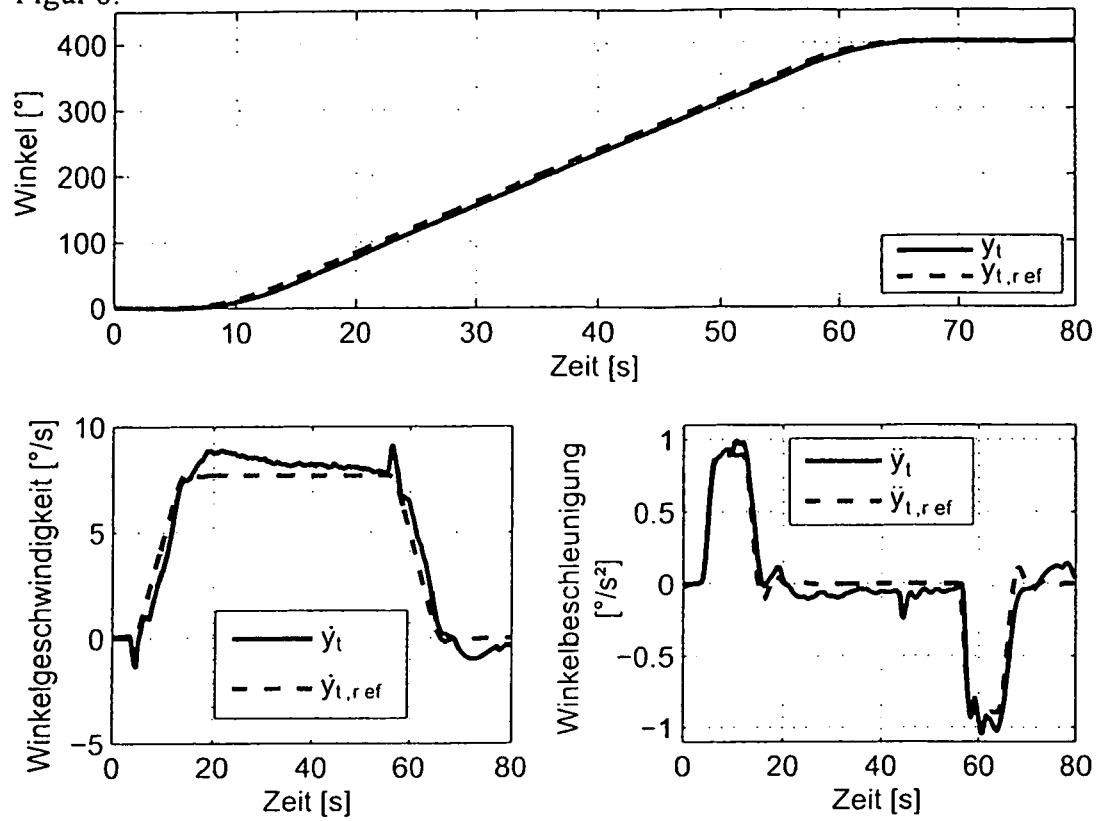
Figur 6:



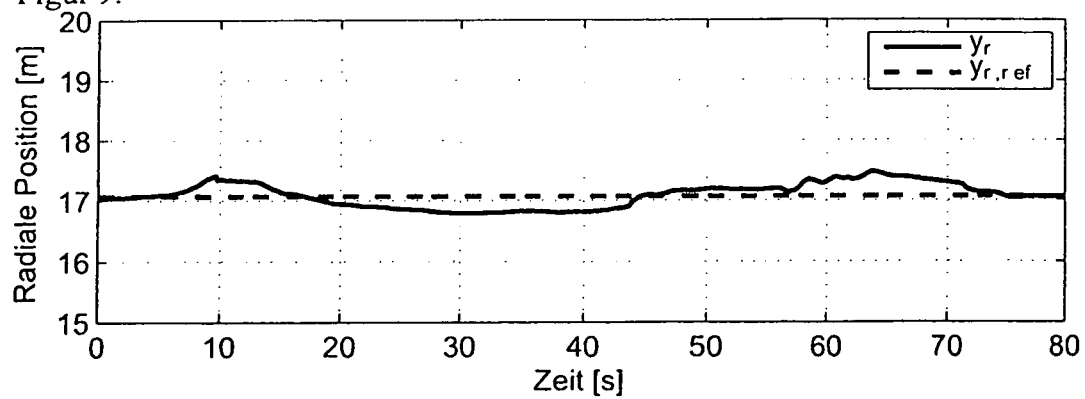
Figur 7:



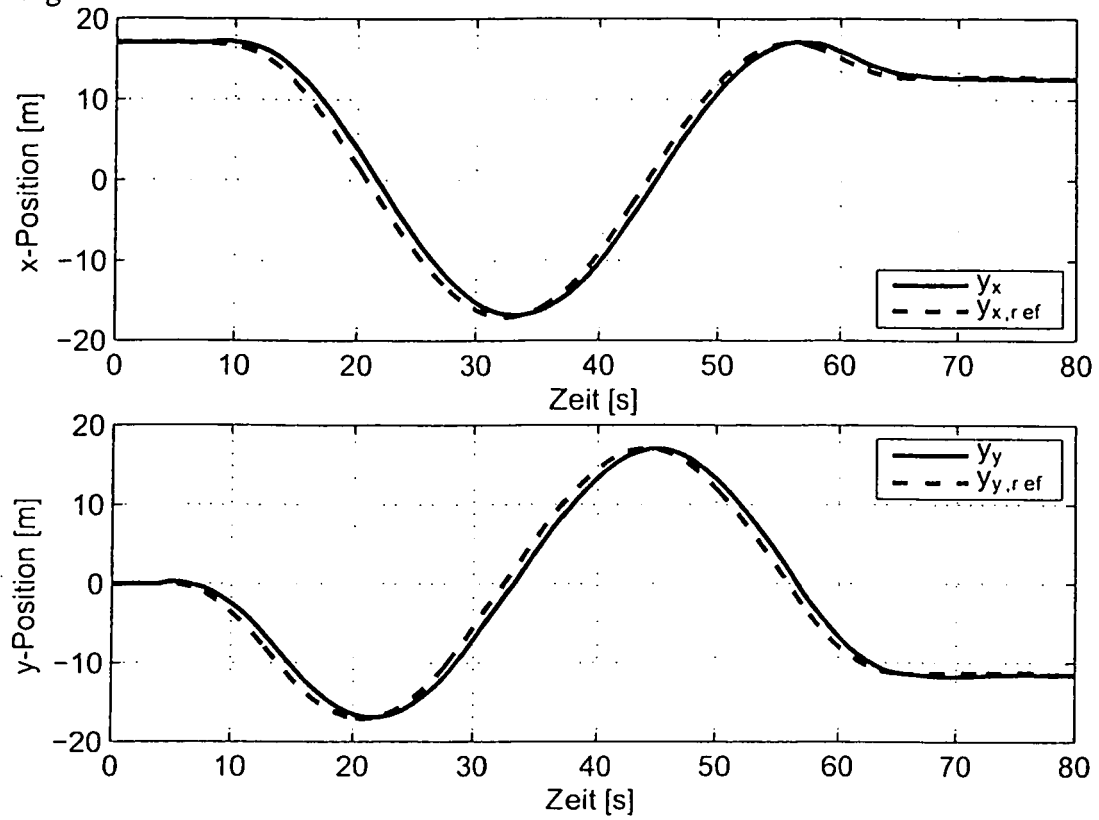
Figur 8:



Figur 9:



Figur 10:





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 10 00 5289

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	WO 02/00543 A2 (SANDIA CORP [US]) 3. Januar 2002 (2002-01-03) * Seite 15, Zeile 1 - Seite 18, Zeile 10 * * Abbildungen 1-5 * * Seite 5, Zeile 1 - Zeile 31 * -----	1-15	INV. B66C13/06
A	WO 97/45357 A1 (SIEMENS AG [DE]; WIENKOP UWE [DE]; MEIER CHRISTOF [DE]) 4. Dezember 1997 (1997-12-04) * Zusammenfassung; Abbildungen 1-3 * -----	1-15	
A	DE 100 64 182 A1 (LIEBHERR WERK NENZING [AT]) 8. Mai 2002 (2002-05-08) * Zusammenfassung * -----	1-15	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			B66C
2 Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 28. Oktober 2010	Prüfer Faymann, L
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument			

EPO FORM 1503 03/82 (P04C03)

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

EP 10 00 5289

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentedokumente angegeben.

Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

28-10-2010

Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
WO 0200543	A2	03-01-2002	AU	7484701 A	08-01-2002
			US	6496765 B1	17-12-2002

WO 9745357	A1	04-12-1997	EP	0907604 A1	14-04-1999

DE 10064182	A1	08-05-2002	KEINE		

EPO FORM P0481

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

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 10064182 [0002]