

BESCHREIBUNG

Verfahren und Vorrichtung zum Betreiben eines Auslegerdrehkrans sowie Auslegerdrehkran

Technisches Gebiet

Die Erfindung betrifft Auslegerdrehkrane, und insbesondere Verfahren zum Steuern einer Bewegung einer angehängten Last und insbesondere Maßnahmen zur Vermeidung einer Pendelschwingung.

Technischer Hintergrund

Krane und insbesondere Auslegerdrehkrane bzw. Umschlagkrane, wie z.B. Turmdrehkrane, Mobilkrane und dergleichen, ermöglichen die Bewegung einer Last durch Anhängen der Last an ein Hubseil an einem Ausleger, Aufheben der Last, Bewegen der Last in einer im Wesentlichen horizontalen Ebene und Absetzen der Last. Die Bewegung des Auslegers wird dabei durch geeignete Antriebseinrichtungen bewirkt und das Anheben und Absetzen der Last mithilfe eines mit einem Hubseil verbundenen Hubwerks durchgeführt.

Bei Umschlagkranen kann die Zeit, die für einen Transportzyklus benötigt wird, von ausschlaggebender Rolle für den störungsfreien Betrieb sein. Während eines Transportzyklus soll dabei die unproduktive Stillstandzeit des Krans minimiert sowie die produktive Betriebszeit des Krans optimiert werden.

Beispielsweise erfolgt bei einem Turmdrehkran die Bewegung der Last durch Drehen des Auslegers und durch Verfahren einer Laufkatze entlang des Auslegers. Bei Mobildrehkranen erfolgt die Bewegung der Last durch Drehen des Auslegers und ggf. durch Auf- und Niederwippen des Auslegers um eine horizontale Wippachse. Die Antriebseinrichtungen sowie das Hubwerk werden in der Regel von einem Kranführer manuell durch Betätigen geeigneter Bedienelemente einer Kransteuerungseinheit gesteuert, wobei beim Beschleunigen und Abbremsen die angehängte Last bezüglich des Aufhängungspunktes am Ausleger ausgelenkt wird und so eine Pendelbewegung ausgelöst wird. Eine pendelnde Last kann ein

Gefährdungspotential sowohl für Bauarbeiter wie auch für Baueinrichtungen darstellen. Zur Vermeidung einer solchen unerwünschten Pendelbewegung der angehängten Last sind aus dem Stand der Technik Maßnahmen zum Dämpfen der Pendelbewegung während des Kranbetriebs bekannt.

So offenbart beispielsweise die Druckschrift DE 10 2009 032 270 A1 ein Verfahren zur Ansteuerung eines Antriebs eines Mobilkrans, wobei eine Sollbewegung der Auslegerspitze als Eingangsgröße dient, auf deren Grundlage eine Steuergröße zur Ansteuerung des Antriebs berechnet wird. Bei der Berechnung der Steuergröße wird die Schwingungsdynamik des Systems aus Antrieb und der Kranstruktur berücksichtigt, um Eigenschwingungen zu reduzieren.

Aus der Druckschrift EP 1 628 902 B1 ist ein Kran zum Umschlagen von an einem Lastseil hängender Last mit einem Drehwerk zum Drehen des Krans, einem Wippwerk zum Neigen eines Auslegers und einem Hubwerk zum Heben der an dem Seil aufgehängten Last vorgesehen. Mithilfe einer Bahnsteuerung wird modellbasiert eine optimale Steuertrajektorie basierend auf einem nichtlinearen Modellansatz berechnet und durch Rückführung von Zustandsgrößen aktualisiert, wobei die Ausgangsgrößen der Bahnsteuerung direkt oder indirekt als Eingangsgrößen in einer Regelung für die Position bzw. Geschwindigkeit des Krans eingehen. Die Führungsgrößen für die Bahnsteuerung werden so generiert, dass eine Lastbewegung mit minimierten Pendelausschlägen erreicht wird.

Aus der EP 1 652 810 B1 ist ein Verfahren zur Steuerung einer Kranbetriebseinheit zum Unterdrücken von Schwingungen einer an einem Seil eines Krans hängenden Last bekannt, indem eine Steuerung durch Betätigen einer Filtereinheit aufweisenden Steuereinrichtung ausgeführt wird.

Zur Vermeidung der Pendelschwingung ist für die Anwendung in einem Kran bekannt, eine prädiktive Regelung der Kranbewegung vorzunehmen, um Pendelschwingungen zu unterdrücken. Siehe beispielsweise J. Smoczek et al., "Robust Predictive Control of an Overhead Crane", <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.2940>.

Aus der Broschüre „Liebherr Electronics“ der Liebherr Werk Nenzing GmbH von 09/2012 ist die Funktion „Cycloptronic“ bekannt, mittels der ein pendelfreier Betrieb eines Hafenmobilkrans beim Umschlag von ISO-Containern zwischen Frachtern und einem Hafenkantenbereich dargestellt ist.

Insbesondere bei komplexen Kranstrukturen sind herkömmliche Pendeldämpfungseinrichtungen unzureichend, um eine Pendelschwingung in ausreichendem Maße zu dämpfen oder zu unterdrücken. Insbesondere sind die vielfältigen dynamischen Effekte beim Anheben, Absetzen und Bewegen der Last aufgrund von vielfältigen Verformungen der Kranstruktur nur unbefriedigend mithilfe eines physikalischen Modells modellierbar, so dass die Pendelschwingung nicht ausreichend gedämpft werden kann.

So basieren herkömmliche Verfahren in der Regel auf einer ungefähr angenommene Lastposition, die beispielsweise anhand eines Hubseilwinkels bezüglich der Lotrechten näherungsweise, üblicherweise am Aufhängungspunkt des Hubseils am Ausleger, bestimmt wird. Jedoch kann es aufgrund von Winddruck und sonstigen dynamischen Einflüssen zu transversalen Schwingungen des Hubseils kommen, so dass der gemessene Hubseilwinkel nicht dem Winkel der Strecke zwischen Aufhängungspunkt am Ausleger und Lastschwerpunkt entspricht. Auch wird im Kranbetrieb die anzuhängende Last an einer Lastaufnahmeeinrichtung, wie z.B. an einer Unterflasche, angehängt, so dass aufgrund des nicht vernachlässigbaren Gewichts der Lastaufnahmeeinrichtung ein Doppelpendelsystem entsteht, das bei Anregung häufig eine chaotische Schwingbewegung ausführt. Diese ist mit herkömmlichen physikalischen Modellen nur schwer vorhersagbar, wodurch die Qualität einer lediglich auf dem Hubseilwinkel basierenden Pendeldämpfung erheblich beeinträchtigt ist. Zudem kann die ungenügende Vorhersagbarkeit der Pendelschwingung der Last ein Eingriff des Pendeldämpfungsalgorithmus auch dazu führen, dass sich die Pendelschwingung im ungünstigsten Fall verstärkt.

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Betreiben eines Auslegerdrehkrans sowie ein Auslegerdrehkran und ein Computerprogrammprodukt zur Ausführung des Verfahrens zur Verfügung zu stellen, die in verbesserter Weise eine Pendelschwingung dämpft bzw. unterdrückt und weiterhin zusätzliche Betriebsarten ermöglicht, um den Transportprozess der Last sicherer, schneller und einfacher durchführbar zu machen.

Offenbarung der Erfindung

Diese Aufgabe wird durch das Verfahren zum Betreiben eines Auslegerdrehkrans mithilfe einer Zustandsregelung gemäß Anspruch 1 sowie eine entsprechende Vorrichtung und einen Auslegerdrehkran gemäß den nebengeordneten Ansprüchen gelöst.

Weitere Ausgestaltungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Gemäß einem ersten Aspekt ist ein Verfahren zum Betreiben eines Auslegerdrehkrans mithilfe einer Zustandsregelung vorgesehen, wobei die Zustandsregelung eine Regelung einer Bewegung einer angehängten Last zumindest in einer Bewegungsrichtung bewirkt, und auf einem Zustandsvektor basiert, mit folgenden Schritten:

- Erfassen von Zustandsgrößen des Zustandsvektors, der Angaben zu einer Position und einer Geschwindigkeit eines bewegbaren Aufhängungspunktes, an den ein Lastsystem, das ein Hubseil, eine an einem unteren Ende des Hubseils angeordnete Lastaufnahmeeinrichtung und eine unterhalb der Lastaufnahmeeinrichtung angehängte Last umfasst, angehängt ist, und Angaben zu einer Lastposition und einer Lastgeschwindigkeit eines Masseschwerpunktes des Lastsystems relativ zu dem Aufhängungspunkt umfassen,
- Ermitteln mindestens einer Stellgröße zur Bewegung des Aufhängungspunktes in der zumindest einen Bewegungsrichtung basierend auf der Zustandsregelung;
- Betreiben des Auslegerdrehkrans abhängig von der mindestens einen Stellgröße.

Wie eingangs erwähnt, besteht ein Grundproblem beim Transport einer Last mithilfe eines Auslegerdrehkrans darin, die Pendelschwingung der angehängten Last so weit zu dämpfen oder zu unterdrücken, dass ein Anheben und Absetzen sowie das Einhängen und Aushängen der Last durch Baustellenmitarbeiter schnell und in ungefährlicher Weise möglich sind. Ziel ist es, durch Dämpfung der Pendelschwingung in jeder Lasttransportphase zu erreichen, dass keine Pendelschwingung auftritt und so das Aufheben und Absetzen der Last in einem kürzeren Zeitraum erfolgen kann.

Das Lastsystem umfasst die angehängte Last, eine Lastaufnahmeeinrichtung, ein Hubseil einstellbarer Länge, dass die Lastaufnahmeeinrichtung an dem Aufhängungspunkt anbindet, und ein Anschlagmittel, mit dem die angehängte Last an der Lastaufnahmeeinrichtung angehängt ist. Aufgrund des massebehafteten Hubseils und der massebehafteten Lastaufnahmeeinrichtung am unteren Ende des Hubseils bildet das schwingende Lastsystem mit der angehängten Last ein Mehrfachpendelsystem, das nicht trivial modellierbar ist und in der Regel zu erratischen Pendelschwingungen bei lateralen Kraftanregungen führt. Daher ist eine genaue Bestimmung der tatsächlichen Lastposition nicht in einfacher Weise möglich.

Die tatsächliche Lastposition kann eine relative Position eines Masseschwerpunktes des gesamten Lastsystems bezüglich des Aufhängungspunktes am Ausleger angeben und kann beispielsweise als eine Angabe zu einer lateralen Lastauslenkung zu einer Lotrechten durch

den Aufhängungspunkt und/oder als eine Angabe zu einem Pendelwinkel bezüglich eines Aufhängungspunkts des Lastsystems zu einer Lotrechten durch den Aufhängungspunkt in einer oder mehreren lateralen Bewegungsrichtungen bereitgestellt werden. Die Lastgeschwindigkeit kann der relativen Geschwindigkeit des Masseschwerpunkts des gesamten Lastsystems bezüglich des Aufhängungspunktes entsprechen.

Gängige Pendelschwingungsdämpfungsverfahren zur Unterdrückung der Pendelschwingung schätzen die Lastposition, d.h. die Lastauslenkung bzw. den Pendelwinkel, insbesondere ausschließlich anhand eines Hubseilwinkels des Hubseils am Aufhängungspunkt des Auslegers und der Hubseillänge und die Lastgeschwindigkeit durch Ermitteln einer Ableitung des Hubseilwinkels, wodurch in der Realität jedoch keine für die Durchführung einer Zustandsregelung brauchbare Bestimmung der Lastposition und der Lastgeschwindigkeit ermöglicht wird. Eine Verwendung einer dermaßen vereinfachten Bestimmung der Lastposition führt, insbesondere bei Verwendung eines Zustandsreglers, zu einem ungenauen Regelungsverhalten und folglich zu einer unzureichenden Unterdrückung der Pendelschwingung im Kranbetrieb.

Diesbezüglich ist vorteilhaft, eine Regelung für eine Bewegung der Last auf eine tatsächliche bzw. eine in verbesserter Weise ermittelten Lastposition auszulegen und somit die Störwirkung des Schätzfehlers für die Lastposition zu eliminieren.

Dazu kann die Lastposition des Masseschwerpunkts abhängig von einem Hubseilwinkel, der eine Winkelabweichung des an dem Aufhängungspunkt angebrachten Hubseils zur Lotrechten durch den Aufhängungspunkt angibt, von einem Lastseilwinkel, der eine Winkelabweichung eines Masseschwerpunkts bezüglich eines Anhängungspunkts an der Lastaufnahmeeinrichtung zur Lotrechten angibt, von einer Hubseillänge zwischen dem Aufhängungspunkt und einem Masseschwerpunkt der Lastaufnahmeeinrichtung, und von einer Lastseillänge, d.h. einer Länge des Anschlagmittels, zwischen dem Anhängungspunkt und dem Masseschwerpunkt der Last bestimmt werden.

Eine präzisere Bestimmung der Lastposition ermöglicht die Verwendung einer Zustandsregelung für den Betrieb des Auslegerdrehkrans. Dabei eignet sich die Zustandsregelung für die Realisierung verschiedener Betriebsarten des Auslegerdrehkrans. Die Zustandsregelung basiert auf einem Zustandsvektor und liefert bei bereitgestellten Sollvorgaben jeweils eine Stellgröße für die mindestens eine Bewegungsrichtung, insbesondere jeweils eine Verstellgeschwindigkeit einer Antriebseinrichtung, wie z.B. eine Verstellgeschwindigkeit eines Katzfahrwerks eines Turmdrehkrans oder einer

Verstellgeschwindigkeit eines Wippwinkels eines Auslegers eines Mobildrehkrans und/oder einer Verstellgeschwindigkeit eines Drehwerks. Die Zustandsregelung wird entsprechend zeitlich festgelegten Regelungszyklen zyklisch ausgeführt, insbesondere mit Regelungszyklusdauern von zwischen 10ms und 500ms, vorzugsweise zwischen 50 ms und 150 ms.

Es hat sich gezeigt, dass eine Zustandsregelung, die auf einem Steuergerät des Auslegerdrehkrans betrieben wird, mit einem Zustandsvektor vorteilhaft ist, der für eine Bewegungsrichtung zum einen die Position und die Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts des Lastsystems und zum anderen die Lastposition, d.h. die Position des Masseschwerpunkts des Lastsystems relativ zum Aufhängungspunkt, (z.B. Lastauslenkung, Pendelwinkel) angibt.

Die Lastgeschwindigkeit, d.h. die Pendelwinkelgeschwindigkeit, ergibt sich insbesondere durch zeitliches Ableiten der Änderung der Lastposition (Lastauslenkung/ Pendelwinkel). Der Pendelwinkel gibt den Winkel der tatsächlichen Lastauslenkung, d.h. der Auslenkung des Masseschwerpunkts, bezüglich des Aufhängungspunkts am Ausleger zur Lotrechten durch den Aufhängungspunkt in mindestens einer Bewegungsrichtung, d.h. in einer radialen x-Richtung und/oder einer tangentialen y-Richtung an.

Die direkte Anwendung einer Zustandsregelung auf einen solchen Zustandsvektor ermöglicht das Vermeiden jeglicher Ungenauigkeiten, die sich aus elastischen Verformungen ergeben und/oder die durch Quereinflüsse auf die Last und die Lastanhängung bewirkt werden. Die Zustandsregelung kann ausgelegt sein, um z.B. bei einem Mobilkran auf das Drehwerk für die Auslegerdrehung und die Antriebseinrichtung für ein Auslegerwippen oder z.B. bei einem Turmdrehkran auf ein Drehwerk für die Auslegerdrehung und ein Katzfahrwerk für ein Verfahren einer Laufkatze sowie auf ein Hubwerk separat zu wirken, da die Dynamiken der einzelnen Bewegungssysteme sehr unterschiedlich sind. Somit kann eine Bewegung der Last in radialer Richtung durch Ansteuern der entsprechenden Antriebseinrichtung zum Wippen bzw. durch Ansteuern des Katzfahrwerks zum Bewegen der Laufkatze entsprechend einer Stellgröße angesteuert werden, während eine Bewegung in tangentialer Richtung, d. h. um die Drehachse des Auslegers, durch eine Ansteuerung des Drehwerks für eine Auslegerdrehung erreicht werden.

Die Regelungen können entsprechend separat voneinander ausgelegt und implementiert werden. Auf diese Weise können diverse Funktionen einschließlich einer Pendeldämpfungsfunktion in verschiedenen Bewegungsrichtungen realisiert werden und die

entsprechenden Zustandsregler in geeigneter Weise auf die unterschiedlichen Stelldynamiken der Antriebseinrichtungen (Drehwerk, Katzfahrwerk etc.) angepasst werden.

Durch die Verwendung eines Zustandsreglers ist es möglich, die Trajektorien der Stellgrößen zum Ansteuern der Antriebseinrichtungen zum Bewegen angehängten Last exakt vorzugeben, so dass z.B. während der Lastbewegung ein Pendelschwingen der bewegten Last vermieden wird.

Das Unterdrücken des Aufschwingens der Last in allen Phasen während des Kranbetriebs ermöglicht es, zu jedem Zeitpunkt während des Lasttransportvorgangs, d. h. eines Vorgangs des Anhängens der Last, des Anhebens der Last, des Bewegens der Last, des Absenkens der Last und des Abhängens der Last, eine Pendelschwingung zu unterdrücken und somit einen schnelleren Transportvorgang zu gewährleisten, da Wartezeiten aufgrund von Ausschwingvorgängen vermieden werden können.

Das Lastsystem bildet ein Mehrfachpendelsystem zwischen dem Aufhängungspunkt an der Laufkatze LK und dem Massenschwerpunkt der angehängten Last, bei dem weitere nicht vernachlässigbare Massen entlang der Lastaufhängung vorliegen, wie beispielsweise der Lastaufnahmeeinrichtung, das einen weiteren Scheitelpunkt einer Pendelbewegung bildet. Es wurde festgestellt, dass das Doppel- oder Mehrfachpendelsystem des Lastsystems aus Hubseil, Lastaufnahmeeinrichtung, Lastseil und angehängter Last für die Implementierung der Zustandsregelung als Einfachpendel betrachtet werden kann, wenn die Lastposition bezüglich des Aufhängungspunktes an dem Ausleger durch das Verfahren der Sensorfusion oder alternativer Verfahren in genauerer Weise bestimmt wird.

Grundsätzlich kann das Bestimmen der tatsächlichen Lastposition auf vielfältige Weise erfolgen. So kann beispielsweise mit einem Lokalisierungssystem, das einen Positionsvektor von einem ortsfesten Punkt und einem Punkt an der angehängten Last bestimmt, zur Bestimmung der Lastposition verwendet werden. Hierzu können beispielsweise Kamerasystem- oder Transpondersystem-gestützten Lokalisierungssysteme verwendet werden, wie beispielsweise aus DE 10 2020 120 699 A1 bekannt.

Weiterhin hat sich eine Ermittlung der relativen Lastposition durch eine Sensordatenfusion einer ersten Winkelsensoreinrichtung und einer zweiten Winkelsensoreinrichtung bewährt, die Winkelangaben erfassen und an ein Steuergerät übermittelt. Die erste Winkelsensoreinrichtung ist an dem Aufhängungspunkt des Hubseils an dem Ausleger angeordnet, um einen Hubseilwinkel in x- und/oder y-Richtung, d. h. in radialer und/oder

tangentialer Richtung bezüglich der Auslegerdrehachse, zu ermitteln. Der Hubseilwinkel wird bezüglich der Lotrechten durch den Aufhängungspunkt ermittelt.

Da der Hubseilwinkel des Hubseils bezüglich der Lotrechten bestimmt werden muss, kann vorzugsweise eine Kompensation des gemessenen Auslegerwinkels am Aufhängungspunkt des Hubseils vorgesehen sein. Hierbei kann eine Drehwinkeldifferenz zu dem Drehwinkel um den Auslegerdrehpunkt aufgrund einer elastischen Verbiegung des Auslegers z.B. mithilfe eines an sich bekannten physikalischen Modells oder durch eine Messung berücksichtigt werden. Auch kann der Wippwinkel (in vertikaler Richtung) und eine Wippwinkeldifferenz (Neigungswinkel) des Auslegers in der Vertikalen aufgrund einer elastischen Verbiegung des Auslegers z.B. mithilfe eines an sich bekannten physikalischen Modells oder durch eine Messung berücksichtigt werden.

Mithilfe der zweiten Winkelsensoreinrichtung z.B. an der an dem Hubseil angehängten Lastaufnahmeeinrichtung kann ein Lastseilwinkel der angehängten Last bezüglich der Lotrechten durch einen Anhängungspunkt der Last an der Lastaufnahmeeinrichtung in der x- und/oder y-Richtung bestimmt werden. Durch Fusionieren des Hubseilwinkels und des Lastseilwinkels (jeweils in gleichen Richtungen) kann bei Kenntnis der Hubseillänge, d. h. der Abstand zwischen dem Aufhängungspunkt an dem Ausleger und dem Massenschwerpunkt der Lastaufnahmeeinrichtung, und bei Kenntnis oder Vorgabe der Länge des Anschlagmittels bzw. des Lastseils, mit dem die Last an der Lastaufnahmeeinrichtung angehängt ist, die relative Lastposition, d.h. die laterale Lastauslenkung des Masseschwerpunkts des Lastsystems zur Lotrechten durch den Aufhängungspunkt oder der Pendelwinkel des Masseschwerpunkts des Lastsystems in Bezug zu der Lotrechten durch den Aufhängungspunkt an dem Ausleger bestimmt werden. Die Ermittlung der Lastposition kann durch die Anwendung an sich bekannter trigonometrischer Funktionen oder durch eine Näherung aufgrund der relativ geringen Hubseilwinkeln und Lastseilwinkeln von jeweils $< 5^\circ$ anhand einer linearen Funktion erfolgen.

Der Auslegerdrehkran kann dann basierend auf dem so angenommenen virtuellen Einfachpendelsystem mithilfe des Zustandsreglers ohne Berücksichtigung der elastischen Verformung von Kranstrukturen aufgrund von Torsions- und Biegemomenten betrieben werden, so dass die Implementierung der entsprechenden Zustandsregelung in einfacherer Weise möglich ist.

Es kann vorgesehen sein, dass die Zustandsregelung implementiert ist, indem bei einer Änderung eines Kranzustands, insbesondere bei einer Änderung einer Hubseillänge, und

insbesondere abhängig von einer Masse der angehängten Last und/oder einer radialen Position des Aufhängungspunkts, eine Parametrierung einer Zustandsraumbeschreibung im Zustandsraum aktualisiert wird und durch ein Verfahren der Polvorgabe oder ein auf der LQ-Methode basierendes Verfahren eine Linearkombination der Regelabweichungen der Zustandsgrößen ermittelt wird, die zur Berechnung der mindestens einen Stellgröße zur Bewegung des Aufhängungspunktes verwendet wird.

So entspricht eine Zustandsraumdarstellung für eine Bewegungsrichtung in radialer Richtung (x-Richtung)

$$\begin{bmatrix} x' \\ x'' \\ \varphi'_x \\ \varphi''_x \end{bmatrix} = A_{LK} \begin{bmatrix} x \\ x' \\ \varphi_x \\ \varphi'_x \end{bmatrix} + b_{LK} u_{LK}$$

Eine beispielhafte Parametrierung der System-Matrix A_{LK} und des Eingangsvektors b_{LK} ist wie folgt:

$$A_{LK} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a2 & a3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{LK} = \begin{bmatrix} 0 \\ b1 \\ 0 \\ b2 \end{bmatrix}$$

Und beispielsweise:

$$\begin{bmatrix} x' \\ x'' \\ \varphi'_x \\ \varphi''_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{lT} & -\frac{g}{l} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x' \\ \varphi_x \\ \varphi'_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{c}{T} \\ 0 \\ \frac{c}{lT} \end{bmatrix} u_{LK}$$

wobei x der radialen x-Position des Aufhängungspunkts, φ_x dem Pendelwinkel (als Lastposition) in radialer Richtung, c einer vorgegeben Konstanten, T einer Zeitkonstanten einer Übergangsfunktion des Folgens des Aufhängungspunkts bei Ansteuerung mit der Stellgröße u_{LK} (vorzugsweise einer Geschwindigkeit), g der Gravitationskonstanten und l einer Pendellänge l des Lastsystems entsprechen. „‘“ bedeutet die erste zeitliche Ableitung und „‘‘“ die zweite zeitliche Ableitung. Z entspricht dem Zustandsvektor, A_{LK} einer System-Matrix und

$\mathbf{b}_{LK}$ einem Eingangsvektor. Auch andere Parametrisierungen der System-Matrix $\mathbf{A}_{LK}$ und des Eingangsvektors $\mathbf{b}_{LK}$ sind möglich. Die System-Matrix $\mathbf{A}_{LK}$ entspricht einer 4x4 System-Matrix und $\mathbf{b}_{LK}$ einem 4-dimensionalen Eingangsvektor mit Zustandsraumparametern der Zustandsraumdarstellung für die radiale Bewegung des Aufhängungspunkts.

Hier ändert sich die Parametrisierung der System-Matrix $\mathbf{A}_{LK}$ und des Eingangsvektors $\mathbf{b}_{LK}$ bei jeder Änderung der Pendellänge l.

Durch Anwenden eines Polvorgabeverfahrens oder einer LQ-Methode kann sich für eine aktualisierte System-Matrix $\mathbf{A}_{LK}$ ein x-Richtung bezogener Regelungsvektor $\mathbf{Kx} = [K1, K2, K3, K4]^T$ für eine Regelungsgleichung ergeben, die auf die Bewegung des Aufhängungspunkts angewendet wird:

$$u_{LK}^* = (x_{soll} - x(t)) \cdot K1 + (x'_{soll} - x'(t)) \cdot K2 + (\varphi_{xsoll} - \varphi_x(t)) \cdot K3 + (\varphi'_{xsoll} - \varphi'_x(t)) \cdot K4$$

mit t dem aktuellen Zeitschritt der Regelung, u_{LK}^* der Stellgröße der Regelung und $x(t), x'(t), \varphi_x(t), \varphi'_x(t)$ den aktuellen gemessenen und ermittelten Zustandsgrößen.

Das Polvorgabeverfahren und die LQ-Methode sind aus dem Stand der Technik weithin bekannt, wie z.B. aus Holger Lutz, Wolfgang Wendt „Taschenbuch der Regelungstechnik“, Europa-Lehrmittel, 2021, ISBN 9783808558706 und Otto Föllinger, „Regelungstechnik“, Vde Verlag GmbH, 2022, ISBN 9783800755189.

Weiterhin kann eine Zustandsraumdarstellung für eine Bewegungsrichtung in tangentialer Richtung (y-Richtung bzw. θ -Richtung) entsprechen

$$\begin{bmatrix} \theta' \\ \theta'' \\ \varphi'_y \\ \varphi''_y \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{DW} \begin{bmatrix} \theta \\ \theta' \\ \varphi_y \\ \varphi'_y \end{bmatrix} + \mathbf{b}_{DW} u_{DW}$$

Eine beispielhafte Parametrierung der System-Matrix $\mathbf{A}_{DW}$ und des Eingang-Vektors $\mathbf{b}_{DW}$ ist wie folgt:

$$\mathbf{A}_{DW} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a5 & a6 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b_{DW} = \begin{bmatrix} 0 \\ b3 \\ 0 \\ b4 \end{bmatrix}$$

Und beispielsweise:

$$\begin{bmatrix} \theta' \\ \theta'' \\ \varphi_y' \\ \varphi_y'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{mg}{l_A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & (\frac{mx^2}{l_A} + \frac{g}{l}) & -\frac{g}{l} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \theta' \\ \varphi_y \\ \varphi_y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{l_A} \\ 0 \\ \frac{x}{l_A} \end{bmatrix} u_{DW}$$

wobei θ der Position des Aufhängungspunkts, φ_y dem Pendelwinkel in tangentialer Richtung, l_A einem vorgegebenen, insbesondere von einer Masse des Lastsystems abhängigen, l_A ein auf das Drehwerk wirkendes Trägheitsmoment, m der Masse des Lastsystem, und u_{DW} einer Eingangsgröße (vorzugsweise einer Geschwindigkeit) für das Drehwerk, d.h. einer Antriebseinrichtung für eine Bewegung des Aufhängungspunkts in tangentialer Richtung, entsprechen. A_{DW} entspricht einer 4x4 System-Matrix und b_{DW} einem Eingangsvektor mit Zustandsraumparametern der Zustandsraumdarstellung für die tangentiale Bewegung des Aufhängungspunktes. Auch andere Parametrisierungen der System-Matrix und des Eingangsvektors sind möglich.

Durch Anwenden des Polvorgabeverfahrens oder der LQ-Methode kann sich ein y-Richtung bezogener Regelungsvektor $K_y = [K5, K6, K7, K8]^T$ für eine Regelungsgleichung ergeben, die auf die Bewegung des Aufhängungspunkts angewendet wird:

$$u_{DW}^* = (\theta_{soll} - \theta(t)) \cdot K5 + (\theta'_{soll} - \theta'(t)) \cdot K6 + (\varphi_{ysoll} - \varphi_y(t)) \cdot K7 + (\varphi'_{ysoll} - \varphi_y'(t)) \cdot K8$$

mit t dem aktuellen Zeitschritt der Regelung, u_{DW}^* der zu stellenden Stellgröße der Regelung und $\theta(t), \theta'(t), \varphi_y(t), \varphi_y'(t)$ den aktuellen gemessenen und ermittelten Zustandsgrößen.

Auch ist es dadurch möglich, die Zustandsregelung an verschiedene Krankonfigurationen in einfacher Weise durch Auswahl einer überschaubaren Anzahl von Regelungsparameter anzupassen. Die Zustandsregelung kann auf einem Zustandsvektor Z basieren, der die Lastposition und die Lastgeschwindigkeit (relativ zu dem Aufhängungspunkt), d.h. eine Lastauslenkung und eine Lastauslenkungsgeschwindigkeit und/oder den Pendelwinkel und die Pendelwinkelgeschwindigkeit in einer oder zwei lateralen Bewegungsrichtungen umfasst. Der Zustandsvektor Z kann weiterhin eine Angabe zur aktuellen Stellposition und Verstellgeschwindigkeit des betreffenden Stellelements, d.h. des Auslegers, der Laufkatze und

dergleichen, in der betreffenden x- oder y-Richtung umfassen. Die aktuelle Verstellgeschwindigkeit in x-Richtung entspricht oder ist abhängig von beispielsweise einer Wippgeschwindigkeit des Auslegers bei einem Mobilkran oder einer Laufkatzen Geschwindigkeit bei einem Turmdrehkran und in y-Richtung einer Drehwinkelgeschwindigkeit des Auslegers. Entsprechend entspricht z.B. die Stellposition dem Wippwinkel bzw. der Position der Laufkatze am Ausleger für die x-Richtung und dem Drehwinkel für die y-Richtung.

Es kann vorgesehen sein, dass die Zustandsregelung betrieben wird, um eine Pendeldämpfungsfunktion zu realisieren, wenn insbesondere ein manueller oder automatisierter Kranbetrieb eine Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts für zumindest eine der Bewegungsrichtungen vorgibt, wobei zur Pendelschwingungsdämpfung eine Sollvorgabe der Angabe zu der Lastposition und der Lastgeschwindigkeit des Masseschwerpunkts des Lastsystems von jeweils Null vorgegeben wird, die Sollvorgabe für die Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts Null und die Sollvorgabe für eine Position des Aufhängungspunkts als eine abhängig von der vorgegebenen Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts bestimmten Position vorgegeben wird.

Eine Pendeldämpfung erfolgt bei aktiver Zustandsregelung durch Vorgabe einer Lastposition und einer Lastgeschwindigkeit von $\varphi_{xsoll}, \varphi_{ysoll} = 0$, $\varphi'_{xsoll}, \varphi'_{ysoll}$, d.h. durch Vorgabe einer Lastauslenkung von 0 und einer Lastauslenkungsgeschwindigkeit von 0 und/oder durch Vorgabe eines Pendelwinkels von 0 und einer Pendelwinkelgeschwindigkeit von 0. D.h. es ist Regelungsziel, dass keine Relativbewegung des Masseschwerpunkts des Lastsystems zum Aufhängungspunkt stattfindet und der Masseschwerpunkt exakt lotrecht unter dem Aufhängungspunkt ist.

Die Sollvorgabe $x'_{soll}, \theta'_{soll}$ für die Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts einer manuell oder automatisiert vorgegebenen Sollgröße entspricht Null während die Sollvorgabe der Position des Aufhängungspunkts abhängig von der durch den Kranbetrieb vorgegebenen Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts bestimmt wird. So kann die Sollposition des Aufhängungspunktes sich durch zeitliche Akkumulation von Streckeninkrementen ergeben, die jeweils dem Produkt der durch den Kranbetrieb vorgegebenen Sollvorgabe der Geschwindigkeit mit der Regelungszyklusdauer entspricht, um ein Überschwingen bei Erreichen der Endposition zu vermeiden. So kann beispielsweise bei einer Bedienung durch den Kranführer eine Bewegungsgeschwindigkeit des Wippens des Auslegers oder der Laufkatze in x- und/oder durch Drehung des Auslegers in y-Richtung vorgegeben werden, um die Last entsprechend dem Bedienungswunsch zu bewegen.

Die Sollvorgabe kann durch Eingabe mit einem Joystick oder dergleichen vorgenommen werden und entspricht einer gewünschten Verstellgeschwindigkeit einer entsprechenden Antriebseinrichtung, insbesondere in Form einer Drehzahl eines Motors der Antriebseinrichtung in Form eines Drehwerks und/oder eines Katzfahrwerks und dergleichen. Die Sollvorgabe der Geschwindigkeit kann über die Regelung indirekt die Stellgrößen zur Bewegung des Aufhängungspunkts oder entsprechend einer mechanischen Kopplung durch eine Über- oder Untersetzung gemäß einer vorgegebenen (für die Krankonfiguration bekannten) Kopplungsfunktion die Stellgrößen für die Geschwindigkeit des Aufhängungspunktes vorgeben.

Durch Vorgabe von Sollzuständen können verschiedene Betriebsfunktionen realisiert werden. Bei der Pendeldämpfungsfunktion im laufenden Kranbetrieb wird die vom Kranführer vorgegebene Verstellgeschwindigkeit (x- und/oder y-Richtung) zu einer Sollvorgabe für die Position des Aufhängungspunkts in x- bzw. y-Richtung x_{soll} , θ_{soll} abhängig von der Regelungszyklusdauer zyklisch akkumuliert während in diesem Fall keine Sollvorgabe für die Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts x'_{soll} , θ'_{soll} angenommen wird.

Die Pendeldämpfungsfunktion ist während des Kranbetriebs aktiv. Der Kranbetrieb zeichnet sich dadurch aus, dass eine der Sollvorgaben ungleich null ist, oder dass ein Bedienelement zur Bewegung des Krans betätigt wird. Die Pendeldämpfungsfunktion kann aktiv bleiben, solange eine vorbestimmte Nachlaufzeitdauer nach Wegfall der Bedienung eines Bedienelements noch nicht verstrichen ist.

Die Implementierung der Zustandsregelung ermöglicht die Implementierung weiterer Komfortfunktionen für die Bedienung des Auslegerdrehkrans.

Wie oben beschrieben, wird die Regelung nur während des aktiven Kranbetriebs ausgeführt und endet eine vorbestimmte Nachlaufzeit nach Wegfall der Bedienung oder nach Beenden einer automatischen Steuerung einer Kranbewegung. Jedoch kann es vorkommen, dass nach dem Beenden des Kranbetriebs und nach dem Deaktivieren der Zustandsregelung eine Restpendelschwingung verbleibt, beispielsweise aufgrund von Störeinflüssen oder dergleichen. Diesbezüglich kann durch aktives Betätigen des ersten Bedienelements durch einen Kranführer oder durch einen sonstigen Baustellenmitarbeiter, der mit der Kransteuereinheit in entsprechender Kommunikationsverbindung steht, die Pendeldämpfungsfunktion auch bei stillstehendem Auslegerdrehkran für eine vorbestimmte Zeitdauer aktiviert werden, wobei die Sollzustandsgröße der Lastposition und der Lastgeschwindigkeit, d.h. des Pendelwinkels und der Pendelwinkelgeschwindigkeit bzw. der

Lastauslenkung und der Lastauslenkungsgeschwindigkeit auf null gesetzt werden. Nach der Betätigung des ersten Bedienelements bleibt die Zustandsregelung für eine vorbestimmte Nachlaufzeitdauer von zwischen 5 und 20 s aktiv oder so lange aktiv, bis die Lastposition und die Lastgeschwindigkeit für eine bestimmten Zeitdauer von z.B. zwischen 1s und 5s keine Lastbewegung angibt oder eine Lastbewegung von weniger als ein vorgegebener Schwellenwert angibt.

Weiterhin kann nach Betätigen des entsprechenden ersten Bedienelements in an sich bekannter Weise eine Scheitelposition der Pendelschwingung ermittelt werden und als Sollposition festgelegt werden. Zudem kann die Nachlaufzeit der aktiven Zustandsregelung entsprechend der Schwingungsperiodendauer festgelegt werden, wobei die Nachlaufzeit entsprechend der halben Periodendauer festgelegt werden kann.

Es kann vorgesehen sein, dass die Zustandsregelung betrieben wird oder betreibbar ist, um eine Störgrößenausgleichsfunktion zu realisieren, wobei der Störgrößenausgleichsfunktion kontinuierlich eine Sollvorgabe der Angabe zu der Position des Aufhängungspunkts, die abhängig von einer gespeicherten absoluten Position der Last bestimmt wird, und eine Sollvorgabe der Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts von Null vorgegeben werden und die Lastposition und die Lastgeschwindigkeit des Masseschwerpunkts des Lastsystems unberücksichtigt bleiben, insbesondere indem die entsprechenden Regelabweichungen der Lastposition und der Lastgeschwindigkeit des Masseschwerpunkts des Lastsystems während der aktivierten Störgrößenausgleichsfunktion auf null gesetzt werden, wobei insbesondere die Sollvorgabe der Angabe zu der Position des Aufhängungspunktes basierend auf der aktuellen Lastposition des Masseschwerpunkts, einer Pendellänge des Lastsystems und der aktuellen Position des Aufhängungspunktes bestimmt wird.

Als eine weitere alternative oder zusätzliche Betriebsfunktion kann somit eine Störgrößenausgleichsfunktion vorgesehen werden. Dabei kann bei Aktivieren der Störgrößenausgleichsfunktion z.B. durch Betätigen eines zweiten Bedienelement, die aktuelle absolute Position der Last als Soll-Position vorgegeben oder gespeichert werden. Die aktuelle absolute Position der Last ergibt sich dabei als eine zum Aktivierungszeitpunkt der Störgrößenausgleichsfunktion vorliegende Position des Aufhängungspunkt am Ausleger und der vorliegenden Lastposition in Form einer Auslenkung zur Lotrechten durch Addition in einer oder beiden lateralen Richtungen, wobei die absolute Position der Last mithilfe der Lastauslenkung oder des Pendelwinkels z.B. durch Anwenden trigonometrischer Funktionen berechnet wird. Die Regelung erfolgt dann entsprechend der zyklisch an die jeweilige Lastposition des Masseschwerpunkts des Lastsystems und entsprechenden

Lastgeschwindigkeit angepassten Sollvorgaben für eine absolute Position des Aufhängungspunktes. Dabei bleiben die Lastposition und die Lastgeschwindigkeit bei der Regelung unberücksichtigt, insbesondere indem die entsprechende Regelabweichung oder das zugehörige Element (Faktor) des Regelungsvektors K während der aktivierten Störgrößenausgleichsfunktion auf null gesetzt werden.

Die Störgrößenausgleichsfunktion kann manuell aktiviert und deaktiviert werden. Die Störgrößenausgleichsfunktion kann sich automatisch abschalten, wenn ein aktiver Kranbetrieb angefordert wird, da dann das aktive Pendeldämpfungsverfahren aktiviert wird und keine gespeicherte absolute Position des Masseschwerpunkts des Lastsystems mehr gehalten werden soll.

Es kann vorgesehen sein, dass die Zustandsregelung betrieben wird oder betreibbar ist, um eine Positionierfunktion auszuführen, wobei der Zustandsregelung als Sollvorgaben die Angabe zu der relativen Position und der relativen Geschwindigkeit des Masseschwerpunkts des Lastsystems von Null vorgegeben werden und die Position und die Geschwindigkeit des Aufhängungspunktes unberücksichtigt bleiben, insbesondere indem die entsprechenden Regelabweichungen während der aktivierten Positionierfunktion oder das zugehörige Element (Faktor) des Regelungsvektors K auf null gesetzt werden.

Gemäß der Positionierfunktion kann bei Betätigung eines geeigneten dritten Bedienelements, insbesondere durch einen Baustellenmitarbeiter, der über ein mobiles Bediengerät mit dem Steuergerät des Auslegerdrehkrans in Verbindung steht, eine Regelung auf die Lastposition und Lastgeschwindigkeit des Masseschwerpunkts des Lastsystems aktiviert werden, wobei keine Regelung auf eine Position des Aufhängungspunktes vorgenommen wird. Somit wird nur auf die Lastposition (Lastauslenkung bzw. den Pendelwinkel) bzw. die Lastgeschwindigkeit (Lastauslenkungsgeschwindigkeit bzw. die Pendelwinkelgeschwindigkeit) von jeweils Null geregelt. Während das dritte Bedienelement, das vorzugsweise als Tastelement ausgebildet ist, aktiv gehalten wird, kann die Last oder die Lastaufnahmeeinrichtung manuell bewegt werden. Durch Ausüben einer seitlichen Kraft auf die Lastaufnahmeeinrichtung oder die Last führt die aktive Positionierfunktion dazu, dass die Lastaufnahmeeinrichtung seitlich verschoben wird, da die aktive Zustandsregelung versucht, den/die durch die seitliche Kraft von null abweichende Lastposition (Lastauslenkung bzw. Pendelwinkel) zurück auf die Sollvorgabe von null zu regeln. Dadurch werden die entsprechenden Antriebseinrichtungen so bewegt, dass die Ausgleichsbewegung in Richtung der auf die Lastaufnahmeeinrichtung ausgeübten Kraft erfolgt. Nach dem Deaktivieren bzw. Loslassen des dritten Bedienelements kann die oben beschriebene Pendeldämpfungsregelung für eine vorgegebene Zeitdauer von

beispielsweise zwischen 5 und 20 s aktiviert werden, um verbleibende Restschwingungen zu reduzieren.

Es kann vorgesehen sein, dass die Zustandsregelung betrieben wird oder betreibbar ist, um eine Lastanhebefunktion zu realisieren, wenn eine Last angehoben werden soll, wobei die Angabe zu der Lastposition ermittelt wird, wenn eine Hubkraft auf das Hubseil einen vorgegebenen Hubkraftschwellenwert übersteigt und die Last noch nicht abgehoben ist, wobei die Zustandsregelung mit Sollvorgaben für die Lastposition und die Lastgeschwindigkeit und einer Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts von Null durchgeführt wird, wobei die Regelabweichung zur Position des Aufhängungspunkts unberücksichtigt bleibt, insbesondere indem die entsprechenden Regelabweichungen oder das zugehörige Element (Faktor) des Regelungsvektors K während der aktivierten Lastanhebefunktion auf null gesetzt werden.

Insbesondere kann die Lastanhebefunktion bei einem Anheben der angehängten Last im laufenden Kranbetrieb aktiviert werden. In der Praxis tritt in der Regel der Fall auf, dass beim Anhängen der Last der Massenschwerpunkt und der Aufhängungspunkt des Hubseils nicht exakt lotrecht sind. Beim Anheben der Last würde nun aufgrund einer relativen Position des Masseschwerpunkts des Lastsystems von ungleich null eine ggfs. erhebliche Pendelbewegung auftreten. Daher ist vorgesehen, dass vor dem Anheben der Last zunächst das Hubseil so angezogen wird, dass dieses gespannt ist. Das Spannen des Hubseils kann durch Überwachen eines Anstiegs einer Kraft auf das Hubseil bei einem Anziehvorgang festgestellt werden. Die aktive Zustandsregelung im Zustand einer noch nicht angehobenen Last führt nun dazu, dass die von Null abweichende Lastposition (der ausgelenkte Pendelwinkel bzw. die festgestellte Lastauslenkung) ausgeglichen wird und die Regelabweichung bezüglich des Pendelwinkels/ Lastauslenkung null wird. Dadurch wird der Aufhängungspunkt an dem Ausleger exakt über dem Massenschwerpunkt des Lastsystems positioniert, und, wenn dies erreicht ist, kann die Last angehoben werden, ohne dass eine Pendelschwingung auftritt. Insbesondere ist hierzu vorgesehen, dass das Anheben der Last verzögert wird, bis der Pendelwinkel auf null geregelt ist.

Weiterhin kann die Zustandsregelung betrieben werden oder betreibbar sein, um eine Positionsanfahrfunktion zu realisieren, bei der eine gespeicherte absolute Position der Last angefahren wird und die Last dort zum Stillstand gebracht wird, wobei entsprechend einem Nutzerwunsch eine absolute Position der Last gespeichert wird, wobei die Zustandsregelung mit einer Sollvorgabe für die Position des Aufhängungspunkts, die der gespeicherten Position entspricht, einer Sollvorgabe für die Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts von Null, einer Sollvorgabe für die Position und die Geschwindigkeit des Masseschwerpunkts von Null

durchgeführt wird, sobald sich die Position des Aufhängungspunkts im laufenden Kranbetrieb der gespeicherten Position des Aufhängungspunkts insbesondere unter einen vorgegebenen Schwellenabstand angenähert hat.

Gemäß der Positionsanfahrfunktion, die durch Betätigen eines vierten Bedienelement aktiviert wird, kann eine bestimmte Position in einer oder mehreren Bewegungsrichtungen, d. h. in x- und/oder y-Richtung, angefahren werden. Dabei wird die Kranbedienung aktiviert und die Lastbewegung entsprechend der Kranbedienung vorgenommen. Nähert sich die aktuelle Position der gespeicherten Position, wird die Last an der gespeicherten Position angehalten und die Funktion anschließend deaktiviert. So kann nach dem Anhalten der Last an der gespeicherten Lastposition die Last weiter in beliebiger Richtung bewegt werden. Sobald der Schwellenabstand wieder überschritten wird, kann die Positionsanfahrfunktion wieder aktiviert werden.

Die Positionsanfahrfunktion basiert auf der Zustandsregelung für die x-Richtung und/oder die y-Richtung, indem der Abstand der Position des Aufhängungspunkts zu der gespeicherten Position des Aufhängungspunkts überwacht wird. Unterschreitet der Abstand einen vorgegebenen Schwellenwert, so wird die manuell oder automatisiert vorgegebene Sollvorgabe der Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts auf Null gesetzt und die gespeicherte Lastposition als Sollvorgabe eingestellt. Die Lastposition (Pendelwinkel bzw. die Lastauslenkung) und die Lastgeschwindigkeit (die Pendelwinkelgeschwindigkeit bzw. die Lastrelativgeschwindigkeit) werden dann ebenfalls auf Null gesetzt. Somit wird durch das Speichern der Position des Aufhängungspunkts eine Grenze gesetzt, die im laufenden Kranbetrieb nicht überschritten werden kann, ohne dass die Last zunächst an der betreffenden Position bzw. Grenze angehalten wird. Durch Deaktivieren der Positionsanfahrfunktion kann die gespeicherte Position gelöscht werden.

Gemäß einer Korridorfunktion kann eine Bewegungstrajektorie als Abfolge von Soll-Lastpositionen vorgegeben werden, entlang der die Bewegung der angehängten Last gesteuert wird oder steuerbar ist. Beispielsweise kann die Bewegungstrajektorie anhand einer toleranzbehafteten Trajektorie von Lastpositionen vorgegeben werden, z. B. als Bereich von absoluten Lastpositionen, in der eine Bewegung der Last zulässig ist. Erreicht die Last eine absolute Position einer Grenze des vorgegebenen Bewegungsbereiches, so wird die Bewegung der Last gestoppt und die Last an der Grenze des Bewegungsbereiches entlanggeführt, so dass die Last an einem Grenzbereich entlang verfährt. Auf diese Weise können verbotene Bereiche umfahren werden, wenn auf dem direkten Verfahrensweg zwischen Startposition und Zielposition ein verbotener Bereich liegt.

Gemäß einem weiteren Aspekt kann eine Vorrichtung, insbesondere Steuergerät, zum Betreiben eines Auslegerdrehkrans mithilfe einer Zustandsregelung vorgesehen sein, wobei die Zustandsregelung eine Regelung einer Bewegung einer angehängten Last zumindest in einer Bewegungsrichtung bewirkt, und auf einem Zustandsvektor basiert, wobei die Vorrichtung ausgebildet ist zum:

- Erfassen von Zustandsgrößen des Zustandsvektors, der Angaben zu einer Position und einer Geschwindigkeit eines bewegbaren Aufhängungspunkt, an den ein Lastsystem, das ein Hubseil, eine an einem unteren Ende des Hubseils angeordnete Lastaufnahmeeinrichtung und eine unterhalb der Lastaufnahmeeinrichtung angehängte Last umfasst, angehängt ist, und Angaben zu einer Lastposition und einer Lastgeschwindigkeit eines Masseschwerpunkts des Lastsystems bezüglich des Aufhängungspunkts umfassen,
- Ermitteln mindestens einer Stellgröße zur Bewegung des Aufhängungspunktes in der zumindest einen Bewegungsrichtung basierend auf der Zustandsregelung;
- Ansteuern des Auslegerdrehkrans abhängig von der mindestens einen Stellgröße.

Gemäß einem weiteren Aspekt kann das erfindungsgemäße Verfahren mittels eines Steuergeräts auf dem Auslegerdrehkran umgesetzt werden, wobei in dem Steuergerät ein Computerprogrammprodukt zur Ausführung des Verfahrens zur Anwendung kommt, anhand dessen das Steuergerät Befehle zur Ausführung der einzelnen Verfahrensschritte erhält, mittels derer die vorgenannten vorteilhaften technischen Wirkungen erzielt werden, um die zuvor beschriebenen Funktionen auf dem Auslegerdrehkran zu ermöglichen.

Gemäß einem weiteren Aspekt ist ein Auslegerdrehkran vorgesehen, umfassend eine oder mehrere Antriebseinrichtungen zum Bewegen eines Aufhängungspunktes für ein Lastsystem und die obige Vorrichtung, wobei der Auslegerdrehkran durch Ansteuern der einen oder der mehreren Antriebseinrichtungen angesteuert wird.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

Bevorzugte Ausführungsformen werden nachfolgend in Verbindung mit den folgenden Figuren ausführlicher beschrieben. Es zeigen:

Figur 1 eine schematische Darstellung eines Turmdrehkrans;

Figuren 2 und 3 Darstellungen des Lastsystems als Mehrfach- bzw. Einfachpendel;

- Figur 4 eine schematische Darstellung des Steuergeräts zum Betreiben des Turmdrehkrans der Figur 1;
- Figur 5 ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Pendeldämpfungsfunktion;
- Figur 6 ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Störgrößenausgleichsfunktion;
- Figur 7 ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Positionierfunktion;
- Figur 8 ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Lastabhebefunktion;
- Figur 9 ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung einer Positionsanfahrfunktion.

Beschreibung von Ausführungsformen

Figur 1 zeigt in einer schematischen Seitenansicht einen Turmdrehkran 2 zum Anheben, Verfahren und Absetzen einer Last L. Der Turmdrehkran 2 stellt ein Beispiel eines Auslegerdrehkranes im Sinne dieser Beschreibung dar. Der Turmdrehkran 2 umfasst einen wenigstens zu einem Teil zu einem Grund G feststehend angeordneten Turm T mit einer gedachten Hochachse H und einen vom Turm T abragenden Katzausleger KA. Der Katzausleger KA ist in der Figur 1 nicht wippbar ausgelegt. In einem nicht gezeigten Beispiel kann der Katzausleger KA auch wippbar ausgeführt sein, wobei der wippbare Katzausleger KA mittels eines Wippantriebs bewegt wird.

Der Turmdrehkran 2 umfasst ein an der Drehachse angeordnetes Drehwerk DW zum Drehen zumindest des Katzauslegers KA um die Hochachse H. Der Turmdrehkran 2 umfasst eine beispielsweise als Drehwinkelsensor ausgebildete Drehwinkelsensoreinrichtung 510 zur Ermittlung eines Drehwinkels θ_u des Katzauslegers KA um die Hochachse H in einer xy-Ebene. Die xy-Ebene ist allgemein als eine tangentielle y-Richtung und eine radiale x-Richtung bestimmt.

Eine entlang des Katzauslegers KA verfahrbare Laufkatze LK umfasst eine erste und eine zweite Umlenkrolle 202, 204 zum Umlenken eines Hubseils HSL in Richtung einer Lastaufnahmeeinrichtung UF, welche als Unterflasche oder Hakenflasche ausgebildet sein

kann. Die Lastaufnahmeeinrichtung UF umfasst wenigstens eine Umlenkrolle 302 für das Hubseil HSL, kann aber auch eine Mehrzahl von Umlenkrollen für das Hubseil HSL umfassen.

Das Hubseil HSL ist ausgehend von einem Hubwerk HW zum Auf- und Abrollen des Hubseils HSL über die erste Umlenkrolle 202 der Laufkatze LK, die eine Umlenkrolle 302 der Lastaufnahmeeinrichtung UF und die zweite Umlenkrolle 204 der Laufkatze LK geführt. Das Hubseil HSL ist an einem distalen Abschnitt 4 des Katzauslegers KA befestigt.

Das Hubwerk HW kann in an sich bekannterweise eine Bremse, einen Elektromotor, ein Getriebe und eine Seilwinde umfassen. Auf die Seilwinde des Hubwerks HW wird das Hubseil HSL aufgerollt, um die Last L anzuheben, und es wird abgerollt, um die Last L abzusenken. Das Hubseil HSL ist beispielsweise ausgehend von dem Hubwerk über zwei bei oder nahe der Hochachse H angeordnete Umlenkrollen 20 und 22 bis zu der Umlenkrolle 202 der Laufkatze LK geführt.

Eine Hubseillänge l_1 wird mittels eines Hubseillängensensors 610, beispielsweise in Form eines Drehwinkelsensors, der Umdrehungen des Hubwerks HW zählt, ermittelt. Beispielsweise kann über die Erfassung der Drehposition des Hubwerks HW auf den Abstand zwischen der Lastaufnahmeeinrichtung UF und der Laufkatze LK und den Aufhängungspunkt AUP geschlossen werden, der als Hubseillänge l_1 angenommen wird.

Eine Massesensoreinrichtung 620 ist gemäß Figur 1 mit der Umlenkrolle 22 gekoppelt und erfasst die Masse m der angehängten Last L bzw. des Lastsystems an einem Aufhängungspunkt AUP an der Laufkatze LK. Die Massesensoreinrichtung 620 misst beispielsweise eine Zugkraft, die auf die Umlenkrolle 22 ausgeübt wird. Ein von der Sensoreinrichtung 620 ermitteltes Sensorsignal repräsentiert die Masse m .

Eine an der Laufkatze LK angeordnete erste Winkelsensoreinrichtung 210 ist zur Ermittlung eines jeweiligen Hubseilwinkels φ_{1y} , φ_{1x} (in y-Richtung und in x-Richtung) eines oder mehrerer zwischen der Laufkatze LK und der Lastaufnahmeeinrichtung UF befindlichen Abschnitten HSL#1, HSL#2 des Hubseils HSL zum durch den Aufhängungspunkt AUP verlaufenden Lot eingerichtet. Die erste Winkelsensoreinrichtung 210 kann beispielsweise ein Abstandsmesssystem (Optisch oder Ultraschallbasiert) aufweisen, das von dem Hubseilwinkel abhängige Abstände zwischen der ersten Winkelsensoreinrichtung 210 und einem Abschnitt des Hubseils HSL misst und daraus den Hubseilwinkels φ_{1y} , φ_{1x} (in y-Richtung und in x-Richtung) ableitet. Auch andere an sich bekannte Messverfahren zur Ermittlung des Hubseilwinkels φ_{1y} , φ_{1x} sind anwendbar. Der Hubseilwinkel φ_{1y} , φ_{1x} (in y-Richtung und in x-

Richtung) entspricht einem Winkel der Strecke zwischen dem Aufhängungspunkt AUP und einem Masseschwerpunkt der Lastaufnahmeeinrichtung UF zur Lotrechten durch den Aufhängungspunkt AUP. Die erste Winkelsensoreinrichtung 210 steht mit einem Steuergerät 100 in Verbindung, um dort eine Angabe zu dem jeweiligen Hubseilwinkels φ_{1y} , φ_{1x} bereitzustellen.

Eine an der Lastaufnahmeeinrichtung UF angeordnete beispielsweise als Gyroskop ausgebildete zweite Winkelsensoreinrichtung 310 ist zur Ermittlung eines Lastseilwinkels φ_{2x} , φ_{2y} in x-Richtung bzw. y-Richtung zum durch den Anhängungspunkt ANP der Last L an die Lastaufnahmeeinrichtung UF verlaufenden Lot eingerichtet. Der Lastseilwinkels φ_{2x} , φ_{2y} gibt den Winkel zwischen der Strecke zwischen dem Anhängungspunkt ANP und dem Massenschwerpunkt der angehängten Last und der Lotrechten durch den Anhängungspunkt ANP in x-Richtung bzw. y-Richtung an. Die zweite Winkelsensoreinrichtung 310 steht mit dem Steuergerät in Kommunikationsverbindung.

Eine Lastseillänge l_2 des Lastseils LSL bzw. , bei einem sonstigen Anschlagmittel, eine Entfernung zwischen der Lastaufnahmeeinrichtung UF und einem Masseschwerpunkt der Last L ist beispielsweise voreingestellt oder von einem Benutzer bestimmbar. Diese kann alternativ auch mit einer geeigneten Messeinrichtung erfasst werden.

Ein zum Katzausleger KA feststehend angeordnetes Katzfahrwerk KW ist mittels eines Katzseils KSL mit der Laufkatze LK zu deren Bewegung entlang des Katzauslegers KA verbunden ist. Das Katzfahrwerk KW umfasst eine Bremse, einen Elektromotor, ein Getriebe und eine Doppelseilwinde, wobei die Doppelseilwinde zwei über eine gemeinsame Achse verbundene Abschnitte umfasst, welche bei einer Rotation der Doppelseilwinde in eine Drehrichtung einen Teil des Katzseils KSL aufrollt, den anderen Teil abrollt und so die Laufkatze LK bewegt.

Feststehend zu dem Gestell 402 ist eine Positionssensoreinrichtung 420, beispielsweise ein Drehwinkelsensor, der die Umdrehungen des Katzfahrwerks KW zählt, angeordnet, welche ein Sensorsignal erzeugt, das die Position x der Laufkatze LK angibt. Die Position x der Laufkatze LK entspricht der Position des Aufhängungspunkts AUP.

Eine Winkeldifferenzsensoreinrichtung 410 ist zur Ermittlung einer Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ zwischen dem Drehwinkel θ_u des Katzauslegers KA um die Hochachse H und einem aktuellen Drehwinkel θ der Position der Laufkatze LK um die Hochachse H eingerichtet. Die Winkeldifferenzsensoreinrichtung 410 zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ ist

feststehend zum Katzausleger KA, insbesondere an dem Katzausleger KA oder an einem Gestell 402 des Katzfahrwerks KW, angeordnet. Die Winkeldifferenzsensoreinrichtung 410 kann beispielsweise ausgebildet sein, um z.B. mittels Ultraschallmesstechnik einen lateralen Abstand zwischen der Winkeldifferenzsensoreinrichtung 410 und einem Abschnitt KSL#1 des Katzseils KSL zu bestimmen, welcher sich zwischen einer proximalen zum Katzausleger KA feststehenden Umlenkrolle 6 und der Laufkatze LK befindet. Eine distal zum Katzausleger KA angeordnete Umlenkrolle 8 lenkt das Katzseil KSL vom Katzfahrwerk KW zur Laufkatze LK um. Die Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ kann dann entweder in der Winkeldifferenzsensoreinrichtung 410 oder in dem Steuergerät 100 in Abhängigkeit von dem den Abstand repräsentierenden Sensorsignal ermittelt werden. Auch andere an sich bekannte Möglichkeiten zur Bestimmung der Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ sind anwendbar. Die Winkeldifferenzsensoreinrichtung 410 dient dazu, den aufgrund elastischer Verformung des Katzauslegers KA abweichenden Drehwinkel θ_u des Katzauslegers KA vom tatsächlichen Drehwinkel θ der Laufkatze LK bzw. eines Aufhängungspunkt AUP des Lastsystems zu ermitteln.

Das Katzfahrwerk KW umfasst das Gestell 402 und eine zum Gestell 402 feststehend angeordnete Antriebseinheit zum Auf- und Abrollen eines Katzseils KSL. Die zum Gestell 402 feststehend angeordnete Winkeldifferenzsensoreinrichtung 410 ist zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ zwischen einem Drehwinkel θ_u des Katzauslegers KA um eine Hochachse H eines Turms T des Turmdrehkrans 2 und einem aktuellen Drehwinkel θ der Laufkatze LK bzw. des Aufhängungspunkts AUP um die Hochachse H eingerichtet.

Eine weitere an der Laufkatze LK, insbesondere zu deren Fahrgestell feststehend angeordnete, beispielsweise als Gyroskop ausgebildete Neigungssensoreinrichtung 220 dient zur Ermittlung eines Neigungswinkels $\Delta\varphi$ (Wippwinkeldifferenz) der Laufkatze LK zu einer Horizontalen. Die Neigungssensoreinrichtung 220 ermittelt ein Sensorsignal, welches eine Neigung der Laufkatze LK zu einer Horizontalen, insbesondere einen in einer xh -Ebene, welche von Hochachse h und Längsachse x des Katzauslegers KA aufgespannt wird, liegenden Neigungswinkel zu einer Horizontalebene, charakterisiert. Das Steuergerät 100 kann für die Berechnung des aktuellen Hubseilwinkels φ_{1x} in x -Richtung den Neigungswinkel $\Delta\varphi$ als Korrektur berücksichtigen, um den Hubseilwinkel φ_{1x} zur Lotrechten durch den Aufhängungspunkt AUP zu bestimmen. Dies ist notwendig, da in der Regel die erste Winkelsensoreinrichtung 210 sich mit der Laufkatze LK neigt und diesen Winkelfehler bei der Messung des Hubseilwinkels φ_{1x} nicht erkennt.

Das Steuergerät 100 ist als herkömmliche Datenverarbeitungsvorrichtung ausgebildet und führt ein Verfahren aus, um das Drehwerk DW, das Hubwerk HW und das Katzfahrwerk KW

in Abhängigkeit von allen oder einem Teil der folgenden Größen zu betreiben: dem Drehwinkel θ_u , der Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$, dem Hubseilwinkel φ_{1x} , φ_{1y} , dem Lastseilwinkel φ_{2y} , φ_{2x} der Hubseillänge l_1 , der Lastseillänge l_2 , der Masse der angehängten Last, der Position x des Katzfahrwerks und dem Neigungswinkel $\Delta\varphi$ zu betreiben.

Zur Ansteuerung des Drehwerks DW, des Hubwerks HW und des Katzfahrwerks KW werden den darin vorgesehenen Motoren Stelldrehzahlen u_{DW}^* , u_{HW}^* , u_{KW}^* als Stellgrößen vorgegeben. In anderen Ausführungsformen kann die Ansteuerung auch durch eine Drehmomentenvorgabe erfolgen.

Das an der Laufkatze LK aufgehängte Hubseil HSL, die Lastaufnahmeeinrichtung UF, das Lastseil LSL und die Last L bilden ein Lastsystem. Das Lastsystem stellt ein Mehrfachpendel dar, dessen Aufhängungspunkt AUP zwischen zwei Abschnitten HSL#1, HSL#2 des Hubseils HSL angenommen wird. Das Mehrfachpendel wird in den nachfolgenden Figuren 2 und 3 erläutert und umfasst die zwei Abschnitte HSL#1, HSL#2 des Hubseils HSL, die an dem Hubseil HSL hängende Lastaufnahmeeinrichtung UF, ein unterhalb der Lastaufnahmeeinrichtung UF angeordnetes Lastseil LSL und die an dem Lastseil LSL angeordnete Last L. Unter einem Mehrfach- bzw. Doppelpendel wird in diesem Zusammenhang das unterhalb der Laufkatze LK bzw. unterhalb der Umlenkrollen 202, 204 der Laufkatze LK befindliche Lastsystem verstanden.

Für den Kranbetrieb ist eine Bedieneinheit 900 vorgesehen. Die Bedieneinheit 900 ist beispielsweise als ein Steuerpult im Kranführerstand und/oder als eine Funkfernbedienung, die mit dem Steuergerät 100 in Kommunikationsverbindung steht, ausgebildet. Mittels z.B. eines Joysticks 910 der Bedieneinheit 900 können implizit Sollgrößen S_{soll} an die Steuerungseinheit 100 übermittelt werden, die eine Bewegungsgeschwindigkeit in x-Richtung und/oder in y-Richtung angeben. Weiterhin kann ein Anheben oder Absetzen der Last mithilfe des Hubwerks HW von dem Benutzer in Form einer Sollgröße vorgegeben werden. Die Sollgrößen umfassen u_{LKsoll}^* , u_{DWsoll}^* , und/oder u_{HWsoll}^* , und können Stelldrehzahlen für die Motoren des Katzfahrwerks KW, des Drehwerks DW und/oder des Hubwerks HW vorgeben und in entsprechende Bewegungen des Aufhängungspunkts AUP und einer Änderung der Hubseillänge l_1 entsprechend der mechanischen Auslegung in an sich bekannter Weise umgerechnet werden, um Sollvorgaben x'_{soll} , θ'_{soll} , und/oder l'_{soll} zu erhalten. Die Sollvorgaben können auch direkt als x'_{soll} , θ'_{soll} , und/oder l'_{soll} vorgegeben werden.

Figur 2 zeigt eine schematische Abbildung des bei dem Turmdrehkran aus der Figur 1 vorhandenen Doppelpendels. Bei diesem Doppelpendel, das durch die Abschnitte HSL#1,

HSL#2 des Hubseils HSL, die Lastaufnahmeeinrichtung UF, das Lastseil LSL und die Last gebildet wird, ergeben sich bezogen auf eine Richtung zwei relevante Winkel, der Hubseilwinkel φ_1 an dem Aufhängungspunkt AUP in Bezug zu der Lotrechten durch den Aufhängungspunkt AUP und der Lastseilwinkel φ_2 an dem Anhängungspunkt ANP in Bezug zu der Lotrechten durch den Anhängungspunkt ANP.

Figur 3 zeigt die in dieser Beschreibung vorgeschlagene Vereinfachung der Betrachtung des Mehrfachpendels zur Verhinderung bzw. Reduzierung einer Pendelbewegung. Das Mehrfachpendel aus Figur 2 wird für die nachfolgend beschriebenen Zustandsregelung als Einfachpendel betrachtet. Eine relevante Größe dabei ist der Pendelwinkel φ der Auslenkung der Last L gegenüber der Laufkatze LK. Dieser ist nur schwierig mit robuster Sensorik direkt zu erfassen. Für eine Richtung wird der Pendelwinkel φ daher mithilfe des Hubseilwinkels φ_1 , der Hubseillänge l_1 , der Lastseillänge l_2 und des Lastseilwinkels φ_2 berechnet, die wie oben beschrieben erhalten werden. Zum Ausgleichen des Hubseilwinkels φ_{1x} in x-Richtung kann der Neigungswinkel $\Delta\varphi$ des Katzauslegers KA zur Horizontalen berücksichtigt werden, so dass sich für den Hubseilwinkel φ_{1x} in x-Richtung $\varphi_{1x} = \varphi_1 + \Delta\varphi$ ergibt. Diese Korrektur ist für den Hubseilwinkel φ_{1y} in y-Richtung nicht notwendig.

Aufgrund der angenommenen deutlich höheren Masse der Last L im Vergleich zur Masse der Lastaufnahmeeinrichtung UF entspricht als Annahme die Neigung der Lastaufnahmeeinrichtung UF der Auslenkung der angehängten Last und damit φ_2 , d.h. φ_{2x} für die x-Richtung und φ_{2y} für die y-Richtung.

Figur 4 zeigt in Anlehnung an Figur 1 den Signalfluss für die Ermittlung von Stellgrößen in Form von zu stellenden Stell-Drehzahlen u_{LK}^* , u_{DW}^* , u_{HW}^* für die Laufkatze LK, das Drehwerk DW bzw. das Hubwerk HW durch das Steuergerät 100. Die jeweilige Stelldrehzahl kann beispielsweise in % von der maximalen Drehzahl (Nenndrehzahl) für den jeweiligen Antriebsmotor (Katzfahrwerk KF, das Drehwerk DW und das Hubwerk HW) vorgegeben werden.

Der Pendelwinkel φ_x , φ_y in x- und y-Richtung kann mit Bezug auf Figur 4 in einem Pendelwinkelberechnungsblock 110 in dem Steuergerät 100 auf unterschiedliche Weisen berechnet werden.

In einer exakten Berechnung ergibt sich die Länge l des Doppelpendels

$$l = \sqrt{(l_1 \cos(\varphi_{1x}) + l_2 \cos(\varphi_{2x}))^2 + (l_1 \sin(\varphi_{1x}) + l_2 \sin(\varphi_{2x}))^2}$$

Und die Pendelwinkel φ_x , φ_y in x-Richtung bzw. y-Richtung zu

$$\varphi_x = \arcsin\left(\frac{(l_1 \sin(\varphi_{1x}) + l_2 \sin(\varphi_{2x}))}{l}\right)$$

$$\varphi_y = \arcsin\left(\frac{(l_1 \sin(\varphi_{1y}) + l_2 \sin(\varphi_{2y}))}{l}\right)$$

Diese Berechnung kann durch Annäherung in Form einer Sensorfusion vereinfacht werden mit

$$l = l_1 + l_2$$

$$\varphi_x = k_x \varphi_{1x} + (1 - k_x) \varphi_{2x}$$

$$\varphi_y = k_y \varphi_{1y} + (1 - k_y) \varphi_{2y}$$

wobei die Faktoren k_x und k_y als Konstanten, insbesondere in einem Bereich zwischen 0,25 – 0,75, oder gemäß einem Kennfeld oder einer Funktion abhängig von der Hubseillänge l_1 und/oder einer Masse der angehängten Last L vorgegeben werden können, z.B. als $k_x = k_y = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$.

Dem Steuergerät 100 werden zumindest die obigen Sensorgrößen und Sollgrößen S_{soll} zugeführt, um die Stell-Drehzahlen u_{LK}^* , u_{DW}^* , u_{HW}^* gemäß einer Zustandsregelung 120 zu ermitteln. Die Sollgrößen können eine Soll-Drehzahl $u_{KW\text{soll}}^*$ oder ein Solldrehmoment für das Katzfahrwerk KW, eine Soll-Drehzahl $u_{DW\text{soll}}^*$ oder ein Solldrehmoment für das Drehwerk DW und eine Soll-Drehzahl $u_{HW\text{soll}}^*$ oder ein Solldrehmoment für das Hubwerk HW umfassen.

Weitergehend ist ein Funktionsblock 130 vorgesehen, der den Betrieb der Zustandsregelung 120 steuert, insbesondere abhängig von einer Bedienung der Bedieneinheit 900, so dass verschiedene Betriebsfunktionen realisiert werden können.

In einem Drehwinkelberechnungsblock 140 werden der Drehwinkel θ , der durch die Drehwinkelsensoreinrichtung 510 bestimmt wird, und die Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$, die durch die Winkeldifferenzsensoreinrichtung 410 gemessen wird, addiert und ein korrigierter Drehwinkel θ für einen tatsächlichen Drehwinkel des Katzauslegers KA um die Hochachse H bereitgestellt.

Mithilfe geeigneter Ableitungsblöcke 150, 160, 170, 190 können die zeitlichen Ableitungen für die Pendelwinkel φ_x , φ_y , den korrigierten Drehwinkel θ und die Geschwindigkeit x' des Aufhängungspunktes AUP als φ'_x , φ'_y , θ' und x' gebildet werden.

Weiterhin wird Position x der Laufkatze LK (als Position des Aufhängungspunktes AUP) von der Positionssensoreinrichtung 420 der Zustandsregelung bereitgestellt. Mithilfe des Ableitungsblocks 190 kann als zeitliche Ableitung eine Laufkatzgeschwindigkeit $\dot{x}$ (als Geschwindigkeit des Aufhängungspunktes AUP) der Zustandsregelung 120 bereitgestellt werden. Alternativ kann die Laufkatzgeschwindigkeit $\dot{x}$ direkt aus dem Steuergerät 900 ausgelesen werden, weil sie dort bei bekannter (gemessener) Motordrehzahl und bekanntem Übersetzungsverhältnis sehr genau vorliegt.

Ein Regelungsparameterblock 180 ist vorgesehen, um abhängig von einer Masse m des Lastsystems, die von der Massesensoreinrichtung 620 gemessen wird, abhängig von einer Position x der Laufkatze LK (bzw. des Aufhängungspunktes), die von der Positionssensoreinrichtung 420 gemessen wird, und von einer Hubseillänge l_1 oder gesamten Pendellänge l des Mehrfachpendels Regelungsparameter in Form eines Regelungsvektors $K_x = [K_1, K_2, K_3, K_4]^T$, $K_y = [K_5, K_6, K_7, K_8]^T$ für die jeweilige Bewegungsrichtung (x - und/oder y -Richtung) aus der von der Masse m , der Pendellänge l und ggfs. der Position x der Laufkatze LK (bzw. des Aufhängungspunktes) abhängige und stets aktualisierte System-Matrix A und dem Eingangsvektor b zu ermitteln. Die Regelungsparameter K werden der Zustandsregelung 120 bereitgestellt.

Die System-Matrix A und der Eingangsvektor b wird bei einer Änderung mindestens einer der Größen Masse m , der Pendellänge l und der Position x der Laufkatze LK (bzw. des Aufhängungspunktes) insbesondere um mehr als einen vorgegeben absoluten oder relativen Abweichungswert (von z.B. 2%) entsprechend einem an sich bekannten Bestimmungsverfahren für Zustandsraumparameter aktualisiert. Mit der System-Matrix A und dem Eingangsvektors b führt der Regelungsparameterblock 180 ein an sich bekanntes Polvorgabeverfahren oder ein auf einer an sich bekannten LQ-Methode basierenden Verfahren aus, um basierend auf der Zustandsraumbeschreibung den jeweiligen Regelungsvektor K_x , K_y zu bestimmen.

Die Zustandsregelung 120 kann mithilfe einer Zustandsraumdarstellung beschrieben werden. Bei der Zustandsraum-Darstellung werden lineare Systeme n -ter Ordnung in n Teilsysteme erster Ordnung zerlegt, um die eine einfache Regelungsparametrisierung zu ermöglichen. Die Zustandsregelungen für das Katzfahrwerk KW und das Drehwerk DW können separat betrachtet werden.

Bei der Zustandsregelung für das Katzfahrwerk KW werden als Zustandsgrößen der Pendelwinkel φ_x in x-Richtung, dessen Pendelwinkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_x$, die Position x der Laufkatze und die Geschwindigkeit $\dot{x}$ der Laufkatze LK berücksichtigt.

Die Aufgabe der Zustandsregelung besteht darin, aus den Zustandsgrößen des Zustandsgrößenvektors Z und den vorgegebenen Sollgrößen $S_{\text{soll}} = u_{KW\text{soll}}^*, u_{DW\text{soll}}^*, u_{HW}^*$ bzw. ggfs. nach entsprechender Umrechnung $x'_{\text{soll}}, \theta'_{\text{soll}}, l'_{\text{soll}}$ die Stellgrößen $u_{LK}^*, u_{DW}^*, u_{HW}^*$ zu errechnen. Dabei werden die Regelungsabweichungen der Zustandsgrößen mit den jeweils aktualisierten Regelungsparametern aus den Regelungsvektoren Kx, Ky multipliziert. Die Summe dieser Produkte ist dann die jeweilige gesuchte Stellgröße.

Die Zustandsraumdarstellung für das Lauffahrwerk LK lautet:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\varphi}_x \end{bmatrix} = A_{LK} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \varphi_x \\ \dot{\varphi}_x \end{bmatrix} + b_{LK} u_{LK};$$

wobei $\ddot{x}$ der Beschleunigung der Laufkatze LK (d.h. des Aufhängungspunkts AUP) und $\ddot{\varphi}_x$ der Winkelbeschleunigung des Pendelwinkels entsprechen. A_{LK} entspricht einer 4x4 System-Matrix und b_{LK} einem Eingangsvektor mit Zustandsraumparametern der Zustandsraumbeschreibung für das Katzfahrwerk KW. Eine beispielhafte Parametrierung der System-Matrix A_{LK} und des Eingangsvektors b kann wie folgt lauten:

$$A_{LK} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a2 & a3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b_{LK} = \begin{bmatrix} 0 \\ b1 \\ 0 \\ b2 \end{bmatrix}$$

Mit a1, a2, a3, b1, b2 Systemparameter für die Regelung, die in an sich bekannter Weise, z.B. durch physikalische Modellierung oder empirisch bestimmt werden können. Durch entsprechende Anwendung des Polvorgabeverfahren oder der LQ-Methode kann der Regelungsvektor K bestimmt werden, so dass sich als Berechnungsvorschrift für die zyklische Berechnung der Stellgröße u_{LK}^* ergibt:

$$u_{LK}^* = (x_{soll} - x(t)) \cdot K1 + (x'_{soll} - x'(t)) \cdot K2 + (\varphi_{xsoll} - \varphi_x(t)) \cdot K3 + (\varphi'_{xsoll} - \varphi'_x(t)) \cdot K4$$

Im Normalbetrieb mit einer aktiven Pendeldämpfung wird durch die Bedieneinheit 900, insbesondere einen Joystick oder dergleichen, die gewünschte Geschwindigkeit u_{LKsoll}^* der Laufkatze (d.h. des Aufhängungspunkts AUP) im Bereich von -100 bis 100% einer vorgegebenen Nenngeschwindigkeit vorgegeben. Diese wird entsprechend der mechanischen Kopplung zur Laufkatze bzw. des Aufhängungspunkts AUP in die Geschwindigkeit x' der Laufkatze bzw. des Aufhängungspunkts AUP umgerechnet.

Bei der Zustandsregelung für das Drehwerk DW werden als Zustandsgrößen der Pendelwinkel φ_y in y-Richtung, dessen Pendelwinkelgeschwindigkeit φ'_y , der Drehwinkel θ des Katzauslegers und die Drehwinkelgeschwindigkeit θ' des Katzauslegers berücksichtigt.

Die Zustandsraumdarstellung für das Drehwerk DW lautet:

$$\begin{bmatrix} \theta' \\ \theta'' \\ \varphi'_y \\ \varphi''_y \end{bmatrix} = A_{DW} \begin{bmatrix} \theta \\ \theta' \\ \varphi_y \\ \varphi'_y \end{bmatrix} + b_{DW} u_{DW}$$

wobei θ'' der Drehwinkelbeschleunigung und φ''_y der Winkelbeschleunigung des Pendelwinkels in y-Richtung entsprechen. A_{DW} entspricht einer 4x4 System-Matrix und b_{DW} einem Eingangsvektor mit Zustandsraumparametern der Zustandsraumbeschreibung für das Drehwerk DW. Eine beispielhafte Parametrierung der System-Matrix A_{DW} und des Eingangsvektors b_{DW} ist wie folgt:

$$A_{DW} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a5 & a6 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b_{DW} = \begin{bmatrix} 0 \\ b3 \\ 0 \\ b4 \end{bmatrix}$$

Mit $a4$, $a5$, $a6$, $b3$, $b4$ Regelungsparameter für die Regelung, die in an sich bekannter Weise, z.B. durch physikalische Modellierung oder empirisch bestimmt werden können. Durch entsprechende Anwendung des Polvorgabeverfahren oder der LQ-Methode kann der

Regelungsvektor $K_y = [K5, K6, K7, K8]^T$ bestimmt werden, so dass sich als Berechnungsvorschrift für die zyklische Berechnung der Stellgröße u_{DW}^* ergibt:

$$u_{DW}^* = (\theta_{soll} - \theta(t)) \cdot K5 + (\theta'_{soll} - \theta'(t)) \cdot K6 + (\varphi_{ysoll} - \varphi_y(t)) \cdot K7 + (\varphi'_{ysoll} - \varphi'_y(t)) \cdot K8$$

Im Normalbetrieb mit einer aktiven Pendeldämpfung wird durch die Bedieneinheit 900, insbesondere einen Joystick oder dergleichen, die gewünschte Drehgeschwindigkeit u_{DWsoll}^* des Drehwerks im Bereich von -100 bis 100% einer vorgegebenen Nenngeschwindigkeit vorgegeben. Diese wird entsprechend der mechanischen Kopplung zur Laufkatze bzw. des Aufhängungspunkts AUP in die Drehwinkelgeschwindigkeit θ' des Katzauslegers bzw. eine Winkelgeschwindigkeit des Aufhängungspunkts AUP umgerechnet.

Der Zustandsregler kann das Hubwerk HW ebenfalls umfassen und als Zustandsgröße die gesamte Pendellänge l und die Pendellängengeschwindigkeit l' umfassen. Das Regelungsmodell kann entsprechend folgende Struktur aufweisen:

$$\begin{bmatrix} x' \\ x'' \\ \varphi'_x \\ \varphi''_x \\ \theta' \\ \theta'' \\ \varphi'_y \\ \varphi''_y \\ l' \\ l'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & & & & & & \\ & A_{LK} & & A_{DW \rightarrow LK} & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & A_{DW} & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x' \\ \varphi_x \\ \varphi'_x \\ \theta \\ \theta' \\ \varphi_y \\ \varphi'_y \\ l \\ l' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} & 0 & 0 \\ & b_{LK} & 0 \\ & & 0 \\ 0 & & 0 \\ 0 & & 0 \\ 0 & b_{DW} & 0 \\ 0 & & 0 \\ 0 & & 0 \\ 0 & & b_{HW} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{LK} \\ u_{DW} \\ u_{HW} \end{bmatrix}$$

Die Zustandsregelung nutzt die Sollgrößen u_{DWsoll}^* , u_{LKsoll}^* und u_{HWsoll}^* als Sollvorgaben. Die entsprechenden Sollvorgaben für die Regelung entsprechen dann den umgerechneten θ'_{soll} , x'_{soll} und l'_{soll} , die sich aus der Umrechnung der den Sollgrößen u_{DWsoll}^* , u_{LKsoll}^* und u_{HWsoll}^* (Sollvorgaben) entsprechenden Drehzahlen der Antriebseinrichtungen DW, LW, HW in die entsprechenden Bewegungsgeschwindigkeiten des Drehwerks und des Katzfahrwerks KW in lateralen Richtungen (x, y) und der Last in vertikaler Richtung (h) ergeben.

Die Regelung kann einer Regelungszyklusdauer von zwischen 10ms bis 500ms folgen. Die Regelung kann einen Beobachter aufweisen, der die Zustandsgrößen im Voraus für den jeweils nächsten Zeitschritt berechnet. Beobachterstrukturen sind aus dem Stand der Technik bekannt und werden hierin nicht näher erläutert.

Im Gegensatz zu einem konventionellen Regelungssystem wird anhand der vorhandenen Zustandsgrößen eine optimale Trajektorie der Stellgrößen u_{LK}^* , u_{DW}^* , u_{HW}^* (unter Neutralisierung einer zur Pendelbewegung führenden Aufschwingung) der Last berechnet, sodass es zur keiner durch den Kranführer oder durch die Kranoperation herbeigeführten starken Pendelbewegung kommen kann. Eine nachträgliche Dämpfung des schwingenden Pendelsystems ist somit nicht erforderlich. Nach der Aktivierung der Zustandsregelung zur Durchführung einer Pendeldämpfungsfunktion durch eine entsprechende Sollvorgabe S_{soll} nach Abheben der Last werden die Sollgrößen in die entsprechenden Sollvorgaben θ'_{soll} , x'_{soll} und l'_{soll} entsprechend der jeweiligen mechanischen Kopplung zwischen dem Katzfahrwerk KW, dem Drehwerk DW und dem Hubwerk HW zu der Laufkatze LK, dem Katzausleger KA und der Lastaufnahmeeinrichtung UF umgerechnet und in der Regelung berücksichtigt:

Für die x-Richtung:

$$u_{LK}^* = (x_{soll} - x(t)) \cdot K1 + (x'_{soll} - x'(t)) \cdot K2 + (\varphi_{xsoll} - \varphi_x(t)) \cdot K3 + (\varphi'_{xsoll} - \varphi'_x(t)) \cdot K4$$

Für die y-Richtung:

$$u_{DW}^* = (\theta_{soll} - \theta(t)) \cdot K5 + (\theta'_{soll} - \theta'(t)) \cdot K6 + (\varphi_{ysoll} - \varphi_y(t)) \cdot K7 + (\varphi'_{ysoll} - \varphi'_y(t)) \cdot K8$$

mit t dem aktuellen Zeitschritt der Regelung und $x(t), x'(t), \varphi_x(t), \varphi'_x(t), \theta(t), \theta'(t), \varphi_y(t), \varphi'_y(t)$ den aktuellen gemessenen und ermittelten Zustandsgrößen.

Für die Pendeldämpfungsfunktion während des Kranbetriebs gilt:

$$x_{soll} = f(u_{LKsoll})$$

$$x'_{soll} = 0$$

$$\varphi_{xsoll} = 0$$

$$\varphi'_{xsoll} = 0$$

$$\theta_{soll} = f(u_{DWsoll})$$

$$\theta'_{soll} = 0$$

$$\varphi_{ysoll} = 0$$

$$\varphi'_{ysoll} = 0$$

Die Funktionen zur Ermittlung der Sollposition des Aufhängungspunkts entsprechen

$$x_{soll}(t) = f(u_{LKsoll}^*) = x_{soll}(t-1) + x'_{soll}(t-1) * \Delta t$$

$$\theta_{soll}(t) = g(u_{DWsoll}^*) = \theta_{soll}(t-1) + \theta'_{soll}(t-1) * \Delta t$$

Mit Δt der Regelungszyklusdauer von z.B. zwischen 10ms und 100ms. Ferner können die Funktionen $f()$ und $g()$ noch Rampenfunktionen für die Geschwindigkeiten berücksichtigen, um Änderungsraten der Vorgabegrößen zu limitieren.

Das gesamte Regelungssystem kann durch den obigen Zustandsregler beschrieben werden. Der Zustandsregler ist jederzeit beim Betrieb des Turmdrehkrans aktiv und bleibt für eine vorgegebene Nachlaufzeit nach dem Beenden einer Bedienvorgabe aktiv, um etwaiges Nachschwingen zu unterbinden.

Die Regelung kann alternativ auch nur auf eine oder zwei der Bewegungskomponenten, d. h. der Bewegung der Laufkatze (d.h. x-Bewegung des Aufhängungspunkts AUP) (x-Richtung), der Drehbewegung des Katzauslegers (d.h. y-Bewegung des Aufhängungspunkts AUP) (y-Richtung) oder der Bewegung des Hubwerks (h-Richtung) erfolgen. Entsprechend verringern sich dabei die betrachteten Zustände der Zustandsregelung 120 um die betreffenden Größen.

Zur Nutzung der Pendeldämpfungsfunktion, die durch die Zustandsregelung erreicht wird, können weitere zusätzliche Funktionen zum Betreiben des Turmdrehkrans implementiert werden.

Dazu kann beispielsweise ein erstes Bedienelement 920 an der Bedieneinheit 900 vorgesehen sein, mit dem der Benutzer vorhandene Last- oder Restpendelschwingungen gemäß einer Pendeldämpfungsfunktion dämpfen kann, die nach einem Lasttransportvorgang auftreten. Diese Pendeldämpfungsfunktion entspricht der herkömmlichen oben beschriebenen Pendeldämpfungsfunktion, die bei Betätigen des ersten Bedienelements 920, das beispielsweise als Tastschalter ausgebildet sein kann, aktiviert wird und während einer Nachlaufzeit von z.B. zwischen 5 und 30 s, vorzugsweise zwischen 5 und 15 s, insbesondere von 10 s, nach Ende der Betätigung des ersten Bedienelements 920 aktiv bleibt. Die Nachlaufzeit kann fest vorgegeben werden oder von einer aktuellen Pendellänge l abhängen. So kann die jeweilige Nachlaufzeit variabel durch eine Funktion oder eine Look-up-Tabelle abhängig von der Pendellänge l vorgegeben sein.

Durch das Vorsehen der Funktion des ersten Bedienelements 920 hat der Kranführer des Turmdrehkrans die Möglichkeit, ein bei inaktivem Kranbetrieb, d. h. es findet keine aktive Transportbewegung statt, z.B. eine aufgrund einer kurzzeitigen plötzlichen Krafteinwirkung auf das Lastsystem auftretende Pendelschwingung zu reduzieren.

Weiterhin kann zusätzlich beim Betätigen des ersten Bedienelements 920 kann dazu zunächst eine Sollposition der Last bestimmt werden, die als zusätzliche Sollvorgabe für die Regelung verwendet wird. In der Regel entspricht die Position der Last L der Position x der Laufkatze (d.h. des Aufhängungspunkts AUP) und dem aktuellen Drehwinkel θ des Auslegers. Diese Angaben werden dann als Sollvorgaben x_{store} , θ_{store} gespeichert und neben den Sollvorgaben $\theta'_{soll}=0$, $x'_{soll}=0$ und $l'_{soll}=0$ (keine Ansteuerung zum Kranbetrieb) zur Pendeldämpfung angenommen und die Zustandsregelung entsprechend durchgeführt. Für die Sollvorgaben in der obigen Regelungsvorschrift gilt dann:

$$x_{soll} = x_{store}$$

$$x'_{soll} = 0$$

$$\varphi_{xsoll} = 0$$

$$\varphi'_{xsoll} = 0$$

$$\theta_{soll} = \theta_{store}$$

$$\theta'_{soll} = 0$$

$$\varphi_{ysoll} = 0$$

$$\varphi'_{ysoll} = 0$$

Figur 5 zeigt ein entsprechendes Flussdiagramm zur Veranschaulichung dieser Pendeldämpfungsfunktion.

In Schritt S1 wird überprüft, ob die Pendeldämpfungsfunktion bei inaktivem Kranbetrieb aktiviert ist. Ist dies der Fall (Alternative: Ja), so wird das Verfahren mit Schritt S2 fortgesetzt. Andernfalls (Alternative: Nein) wird das Verfahren mit S1 fortgesetzt.

In Schritt S2 wird die Position x, θ der Laufkatze LK (d.h. des Aufhängungspunkts AUP) als x_{store} , θ_{store} zwischengespeichert und für die nachfolgende Regelung als Sollgröße angenommen.

In Schritt S3 wird die Zustandsregelung ausgeführt, wobei die Sollvorgaben $x_{soll} = x_{store}$, $\theta_{soll} = \theta_{store}$, l_{soll} neben den Sollvorgaben $\theta'_{soll}=0$, $x'_{soll}=0$ und $l'_{soll}=0$ zur Pendeldämpfung angenommen und die Zustandsregelung entsprechend durchgeführt.

In Schritt S4 wird überprüft, ob die Pendeldämpfungsfunktion beendet ist und eine Nachlaufzeit verstrichen ist. Ist dies der Fall (Alternative: Ja), wird das Verfahren beendet, andernfalls (Alternative: Nein) wird zu Schritt S3 zurückgesprungen und die Zustandsregelung fortgesetzt.

Mithilfe einer Funktionserweiterung, die durch ein zweites Bedienelement 930 aktiviert oder deaktiviert werden kann, kann eine Störgrößenausgleichsfunktion vorgesehen werden. Die Störgrößenausgleichsfunktion kann beispielsweise Fremdeinwirkungen auf das Lastsystem, wie beispielsweise durch Winddruck, Schwingungen des Untergrunds berücksichtigen und die aktuelle Position der Last L trotz dem Vorliegen von (andauernden) Störeinflüssen halten. Wird die Funktion durch Betätigen des zweiten Bedienelements 930 aktiviert, so bleibt diese aktiv, bis diese durch entsprechendes Betätigen des zweiten Bedienelement 930 beendet wird. Die Störgrößenausgleichsfunktion ist weiterhin nur so lange aktiv, wie der Kran nicht aktiv betrieben wird, d.h. die Last nicht durch externe Sollvorgaben bewegt wird.

In Figur 6 ist ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung der Störgrößenausgleichsfunktion dargestellt.

In Schritt S11 wird überprüft, ob die Störgrößenausgleichsfunktion bei inaktivem Kranbetrieb aktiviert ist. Ist dies der Fall (Alternative: Ja), so wird das Verfahren mit Schritt S12 fortgesetzt. Andernfalls (Alternative: Nein) wird das Verfahren mit S11 fortgesetzt.

In Schritt S12 wird als Sollvorgabe die aktuelle absolute Lastposition p_{xsoll} , p_{ysoll} gespeichert. Die aktuelle, zu speichernde absolute Lastposition p_{xsoll} , p_{ysoll} kann sich ergeben als

$$p_{xsoll} = x + \sin(\varphi_x) \cdot l$$

$$p_{ysoll} = \theta + \arctan \frac{\sin(\varphi_y) \cdot l}{x}$$

In Schritt S13 wird die Zustandsregelung aktiviert, wobei der Zustandsregelung entsprechend den Regelungszyklen variierende Sollvorgaben für die Position x_{soll} der Laufkatze und den Drehwinkel θ_{soll} vorgegeben werden. Die Pendellänge l_{soll} bleibt unverändert.

Für die Beibehaltung der absoluten Position p_{xsoll} , p_{ysoll} der Last gilt dann:

$$x_{soll} = p_{xsoll} - \sin(\varphi_x) \cdot l$$

$$\theta_{soll} = p_{ysoll} - \arctan \frac{\sin(\varphi_y) \cdot l}{x}$$

Diese Werte werden kontinuierlich ermittelt, d.h. zu jedem Regelungszyklus neu berechnet, da bei variierendem Störeinfluss sich die Pendelwinkel φ_x, φ_y und Pendelwinkelgeschwindigkeiten φ'_x, φ'_y ständig ändern können.

Die Sollvorgaben der Zustandsgrößen sind dann während der aktiven Störgrößenausgleichsfunktion

$$\begin{aligned}x_{soll} &= p_{xsoll} - \sin(\varphi_x) \cdot l \\x'_{soll} &= 0 \\\varphi_{xsoll} &= \text{unbestimmt} \\\varphi'_{xsoll} &= \text{unbestimmt} \\\theta_{soll} &= p_{ysoll} - \arctan \frac{\sin(\varphi_y) \cdot l}{x} \\\theta'_{soll} &= 0 \\\varphi_{ysoll} &= \text{unbestimmt} \\\varphi'_{ysoll} &= \text{unbestimmt}\end{aligned}$$

wobei x_{soll}, θ_{soll} entsprechend den Regelungszyklen wie oben beschrieben stetig aktualisiert werden. Somit kann auf sich ändernde Störeinflüsse entsprechend reagiert werden und die absolute Position der Last bleibt unverändert.

Die als unbestimmt gekennzeichneten Zustandsgrößen $\varphi_x, \varphi'_x, \varphi_y, \varphi'_y$ bleiben bei der Regelung unberücksichtigt, indem die entsprechende Regelabweichung oder das zugehörige Element (Faktor) des Regelungsvektors K während der aktivierten Störgrößenausgleichsfunktion auf null gesetzt werden.

In Schritt S14 wird überprüft, ob die Störgrößenausgleichsfunktion beendet ist. Ist dies der Fall (Alternative: Ja), wird das Verfahren beendet, andernfalls (Alternative: Nein) wird zu Schritt S13 zurückgesprungen und die Zustandsregelung fortgesetzt.

Die Störgrößenausgleichsfunktion kann durch entsprechendes Betätigen des zweiten Bedienelements 930 oder durch Joystickbedienung zum Einleiten eines Lasttransports deaktiviert werden.

Durch die Betätigung eines dritten Bedienelements 940 (z.B. in Form eines Tastschalters) kann eine Positionierfunktion aktiviert werden. Die Positionierfunktion bleibt aktiv, solange das dritte Bedienelement 940 betätigt ist, und ist während einer vorbestimmten Nachlaufzeit

beispielsweise zwischen 5 und 30 s, vorzugsweise zwischen 5 und 15 s, zum Beispiel 10 s, aktiv. Die Positionierfunktion sieht vor, die Last durch manuelles Drücken und Ziehen im Absetzbereich zu bewegen und so hochgenau an die richtige gewünschte Lastposition zu dirigieren.

In Figur 7 ist ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung der Positionierfunktion dargestellt.

In Schritt S21 wird überprüft, ob die Positionierfunktion bei inaktivem Kranbetrieb aktiviert ist. Ist dies der Fall (Alternative: Ja), so wird das Verfahren mit Schritt S22 fortgesetzt. Andernfalls (Alternative: Nein) wird das Verfahren mit S21 fortgesetzt.

In Schritt S22 wird der Zustandsregler aktiviert, es bleiben jedoch die Sollvorgaben der Positionen x , θ und Geschwindigkeit x' , θ' der Laufkatze LK und des Drehwerks DW unberücksichtigt, wobei die Sollvorgaben wie folgt angenommen werden:

$$x_{soll} = \text{unbestimmt}$$

$$x'_{soll} = \text{unbestimmt}$$

$$\varphi_{xsoll} = 0$$

$$\varphi'_{xsoll} = 0$$

$$\theta_{soll} = \text{unbestimmt}$$

$$\theta'_{soll} = \text{unbestimmt}$$

$$\varphi_{ysoll} = 0$$

$$\varphi'_{ysoll} = 0$$

Die als unbestimmt gekennzeichneten Zustandsgrößen x_{soll} , x'_{soll} , θ_{soll} , θ'_{soll} bleiben bei der Regelung unberücksichtigt, indem die entsprechende Regelabweichung oder das zugehörige Element (Faktor) des Regelungsvektors K während der aktivierten Störgrößenausgleichsfunktion auf null gesetzt werden.

In Schritt S23 wird überprüft, ob die Positionierfunktion beendet ist. Ist dies der Fall (Alternative: Ja), wird das Verfahren beendet, andernfalls (Alternative: Nein) wird zu Schritt S22 zurückgesprungen und die Zustandsregelung fortgesetzt.

Das dritte Bedienelement 940 muss während der Positionierung permanent betätigt werden, um unkontrollierte Bewegungen der Last L zu vermeiden. Der beim Ziehen der Last L bzw. der Lastaufnahmeeinrichtung UF entstehende von Null abweichende Pendelwinkel φ_x , φ_y zwingt die Zustandsregelung zur Ausgleichsbewegung in die Zugrichtung, so dass die Last

entsprechend des Zugs in die entsprechende Richtung bewegt wird. Sobald die Zugkraft wegfällt, positioniert sich die Laufkatze LK exakt über der Last L und fixiert somit die neue Lastposition.

Weiterhin kann eine dauerhaft aktive oder mithilfe eines vierten Bedienelements 950 aktivierbare Lastanhebefunktion realisiert sein, die beim Abheben der Last eine zusätzliche Sicherheit gewährleistet. Befindet sich die Laufkatze LK, d. h. der Aufhängungspunkt AUP des Hubseils, nicht exakt lotrecht über dem Masseschwerpunkt, kann es beim Abheben der Last zu einer sofortigen Pendelschwingung führen, die von dem lateralen Versatz des Aufhängungspunkts AUP zum Masseschwerpunkt abhängt. Dies ist in der Praxis fast immer der Fall, da der Kranführer in der Regel die Lastaufnahmeeinrichtung UF nicht exakt über dem Lastschwerpunkt positionieren kann.

Durch Nutzung der oben beschriebenen Zustandsregelung kann beim Anziehen der Lastaufnahmeeinrichtung UF der Aufhängungspunkt AUP exakt über dem Masseschwerpunkt positioniert werden, bevor die Last L abgehoben wird.

Die Lastanhebefunktion wird anhand des Flussdiagramms der Figur 8 näher erläutert.

In Schritt S31 wird das Hubwerk HW zum Abheben der Last entsprechend der Vorgabe durch den Kranführer z.B. mithilfe eines vierten Bedienelements 950 aktiviert.

In Schritt S32 wird überprüft, ob die Lastabhebefunktion aktiviert ist. Ist dies der Fall (Alternative: Ja), so wird das Verfahren mit Schritt S33 fortgesetzt. Andernfalls (Alternative: Nein) wird das Verfahren mit Sprung zu Schritt S36 beendet.

In Schritt S33 wird die Hubkraft mithilfe der Massesensoreinrichtung 620 überwacht. Überschreitet die Hubkraft einen vorbestimmten Schwellenhubkraftwert, der durch die Gewichtskräfte der Lastaufnahmeeinrichtung UF, des Hubseils HSL und des Lastseils LSL bestimmt sein kann, kann davon ausgegangen werden, dass das Hubseil HSL gespannt ist und der gemessene Pendelwinkel φ_x, φ_y den Versatz des Masseschwerpunkts zum Aufhängungspunkt AUP an der Laufkatze LK angibt. In diesem Fall (Alternative: Ja) wird das Verfahren mit Schritt S34 fortgesetzt, andernfalls (Alternative: Nein) wird zu Schritt S33 zurückgesprungen und weiter auf das Erreichen des Schwellenhubkraftwerts gewartet.

Nun wird in Schritt S54 die Zustandsregelung gestartet, indem als Sollvorgaben vorgegeben werden:

$$x_{soll} = \text{unbestimmt}$$

$$x'_{soll} = \text{unbestimmt}$$

$$\varphi_{xsoll} = 0$$

$$\varphi'_{xsoll} = 0$$

$$\theta_{soll} = \text{unbestimmt}$$

$$\theta'_{soll} = \text{unbestimmt}$$

$$\varphi_{ysoll} = 0$$

$$\varphi'_{ysoll} = 0$$

Die als unbestimmt gekennzeichneten Zustandsgrößen bleiben bei der Regelung unberücksichtigt, indem die entsprechende Regelabweichung oder das zugehörige Element (Faktor) des Regelungsvektors K während der aktivierten Störgrößenausgleichsfunktion auf null gesetzt werden.

In Schritt S35 wird überprüft, ob die Sollvorgabe der Pendelwinkel $\varphi_{xsoll} = 0, \varphi_{ysoll} = 0$ und die Pendelwinkelgeschwindigkeit $\varphi'_{xsoll} = 0, \varphi'_{ysoll} = 0$ erreicht worden ist d.h. alle entsprechenden Regelabweichungen liegen unter einem vorgegebenen Schwellenwert von z.B. weniger als $0,3^\circ$ des entsprechenden Pendelwinkels. Dieser Schwellenwert kann generell abhängig von der Hubseillänge sein, z.B. $0,1^\circ$, z.B. bei Hubseillängen von mehr als 20m und $0,2 - 0,3^\circ$ bei Hubseillängen l_1 von weniger als 20m. Ist dies der Fall (Alternative: Ja), wird das Verfahren mit Schritt S36 fortgesetzt. Andernfalls wird die Zustandsregelung des Schritts S34 weiter fortgesetzt.

Bevor die Hubkraft weiter über den Punkt des tatsächlichen Abhebens der Last erhöht wird, wird somit die Zustandsregelung weiter ausgeführt. Dies ermöglicht die genaue Positionierung der Laufkatze LK über dem Lastschwerpunkt, so dass die Last ohne Anfangspendelschwingung, d.h. lotrecht abgehoben werden kann.

Das Abheben der Last erfolgt dann in Schritt S36.

Ferner kann mithilfe eines fünften Bedienelements 960 eine Positionsanfahrfunktion realisiert werden. Die Positionsanfahrfunktion dient dazu, dass bei Annähern an eine gespeicherte Position die gespeicherte Position angefahren wird und dort die Last L pendelschwingungsfrei angehalten wird. Erst nach dem Anhalten an der gespeicherten Position wird die Positionsanfahrfunktion wieder deaktiviert und die Last kann in eine beliebige Richtung entsprechend der Bedienung des Kranführers bewegt werden.

In Schritt S41 wird überprüft, ob eine Positionsanfahrfunktion aktiviert worden ist. Ist dies der Fall (Alternative: Ja), z.B. bei Betätigen des fünften Bedienelements 960, kann in Schritt S42 eine aktuelle absolute Position $p_x = x + \sin(\varphi_x) \cdot l$, $p_y = \theta + \arctan \frac{\sin(\varphi_y) \cdot l}{x}$ der Last L oder der Laufkatze LK (d.h. des Aufhängungspunkts AUP) x , θ gespeichert werden (z.B. als x_{store} , θ_{store}).

Wird eine absolute Lastposition entsprechend der Positionsanfahrfunktion gespeichert, so kann der Kran in Schritt S43 in herkömmlicher Weise betrieben werden.

Es wird in Schritt S44 überprüft, ob sich die aktuelle absolute Position der Last L bzw. die Position des Aufhängungspunktes AUP der gespeicherten Position nähert, was durch eine kontinuierlich durchgeführte Abfrage bestimmt wird. Wird dies festgestellt (Alternative: Ja), so wird in Schritt S45 die gespeicherte Position $x_{soll} = p_x$, $\theta_{soll} = p_y$ als Sollposition für die Last und angenommen die Zustandsregelung entsprechend ausgeführt. Dabei bleibt die weitere Bedienung des Kranführers (oder einer automatisierten Kransteuerung) für die weitere Sollvorgabe unbeachtlich. Es werden nach Feststellung der Annäherung an die gespeicherte Position lediglich die Positionen x , θ als Sollvorgabe vorgegeben, so dass der Zustandsregler eine reine Positionsregelung betreibt. Die Sollvorgaben entsprechen dann:

$$x_{soll} = p_x;$$

$$x'_{soll} = 0$$

$$\varphi_{xsoll} = 0$$

$$\varphi'_{xsoll} = 0$$

$$\theta_{soll} = p_y;$$

$$\theta'_{soll} = 0$$

$$\varphi_{ysoll} = 0$$

$$\varphi'_{ysoll} = 0$$

Die als unbestimmt gekennzeichneten Zustandsgrößen bleiben bei der Regelung unberücksichtigt, indem die entsprechende Regelabweichung oder das zugehörige Element (Faktor) des Regelungsvektors K während der aktivierten Positionsanfahrfunktion auf null gesetzt werden.

Wird in Schritt S46 das Erreichen der gespeicherten Position festgestellt (Alternative: Ja), so wird die Zustandsregelung zunächst in Schritt S47 beendet. Andernfalls (Alternative: Nein) wird das Verfahren mit Schritt S45 fortgesetzt.

Wird durch das Aktivieren des Kranbetriebs die angefahrene Position wieder verlassen, aktiviert sich die Positionsanfahrfunktion erneut und setzt das Verfahren mit Schritt S43 fort.

Es kann vorgesehen sein, dass durch das erneute Betätigen des fünften Bedienelements 960 die gespeicherte Lastposition vergessen wird.

Ansprüche

1. Verfahren, insbesondere computer-implementiertes Verfahren, zum Betreiben eines Auslegerdrehkrans (2) mithilfe einer Zustandsregelung, wobei die Zustandsregelung eine Regelung einer Bewegung einer angehängten Last (L) zumindest in einer Bewegungsrichtung bewirkt, und auf einem Zustandsvektor basiert, mit folgenden Schritten:
 - Erfassen von Zustandsgrößen des Zustandsvektors, der Angaben zu einer Position (x, θ) und einer Geschwindigkeit $(\dot{x}, \dot{\theta})$ eines bewegbaren Aufhängungspunkt (AUP), an den ein Lastsystem, das ein Hubseil (HSL), eine an einem unteren Ende des Hubseils (HSL) angeordnete Lastaufnahmeeinrichtung (UF) und ggfs. eine unterhalb der Lastaufnahmeeinrichtung (UF) angehängte Last (L) umfasst, angehängt ist, und Angaben zu einer Lastposition (φ_x, φ_y) und einer Lastgeschwindigkeit $(\dot{\varphi}_x, \dot{\varphi}_y)$ eines Masseschwerpunkts des Lastsystems bezüglich des Aufhängungspunkts (AUP) bezüglich der mindestens einen Bewegungsrichtung umfassen,
 - Ermitteln mindestens einer Stellgröße $(u_{LK}^*, u_{DW}^*, u_{HW}^*)$ zur Bewegung des Aufhängungspunktes (AUP) in der zumindest einen Bewegungsrichtung basierend auf der Zustandsregelung;
 - Betreiben des Auslegerdrehkrans (2) abhängig von der mindestens einen Stellgröße $(u_{LK}^*, u_{DW}^*, u_{HW}^*)$.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Zustandsregelung implementiert ist, indem bei einer Änderung eines Kranzustands, insbesondere bei einer Änderung einer Hubseillänge (l_1) und/oder einer radialen Position des Aufhängungspunkts (AUP), und insbesondere abhängig von einer Masse des Lastsystems, eine Parametrierung einer Zustandsraumbeschreibung im Zustandsraum aktualisiert wird und durch ein Verfahren der Polvorgabe oder der LQ-Methode eine durch einen Regelungsvektor (K_x, K_y) angegebene Linearkombination der Regelabweichungen der Zustandsgrößen ermittelt wird, die zur Berechnung der mindestens einen Stellgröße $(u_{LK}^*, u_{DW}^*, u_{HW}^*)$ zur Bewegung des Aufhängungspunktes (AUP) verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die mindestens eine Stellgröße $(u_{LK}^*, u_{DW}^*, u_{HW}^*)$ eine Verstellgeschwindigkeit eines Katzfahrwerks (KW) eines Turmdrehkrans

oder einer Verstellgeschwindigkeit eines Wippwinkels eines Auslegers (KA) eines Mobildrehkrans und/oder einer Verstellgeschwindigkeit eines Drehwerks (DW) umfasst.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Lastposition (φ_x, φ_y) als relative Position des Masseschwerpunkts des Lastsystems bezüglich des Aufhängungspunkts abhängig von einem Hubseilwinkel, der eine Winkelabweichung des an dem Aufhängungspunkt (AUP) angebrachten Hubseils zur Lotrechten durch den Aufhängungspunkt (AUP) angibt, von einem Lastseilwinkel, der eine Winkelabweichung eines Masseschwerpunkts der Last (L) an einem Anhängungspunkt an der Lastaufnahmeeinrichtung (UF) zur Lotrechten angibt, angegeben wird, wobei die Lastposition (φ_x, φ_y) insbesondere weiterhin abhängig von einer Hubseillänge (l_1) zwischen dem Aufhängungspunkt (AUP) und einem Masseschwerpunkt der Lastaufnahmeeinrichtung (UF), und/oder einer Lastseillänge (l_2) zwischen dem Anhängungspunkt (ANP) und dem Lastschwerpunkt bestimmt wird, wobei insbesondere die Lastposition (φ_x, φ_y) als Pendelwinkel (φ_x, φ_y) des Masseschwerpunkts bezüglich der Lotrechten durch den Aufhängungspunkt (AUP) oder als vertikaler Abstand des Masseschwerpunkts zur Lotrechten durch den Aufhängungspunkt (AUP) angegeben wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Zustandsregelung betrieben wird, um eine Pendeldämpfungsfunktion zu realisieren, wenn insbesondere der manuelle oder automatisierte Kranbetrieb eine Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts (AUP) für zumindest eine der Bewegungsrichtungen vorgibt oder ein erstes Bedienelement (920) für eine Aktivierung der Pendeldämpfungsfunktion betätigt wird, wobei zur Pendeldämpfung eine Sollvorgabe der Angabe zu der Lastposition (φ_x, φ_y) und der Lastgeschwindigkeit (φ'_x, φ'_y) des Masseschwerpunkts des Lastsystems von jeweils Null vorgegeben wird, die Sollvorgabe für die Geschwindigkeit (x') des Aufhängungspunkts (AUP) als Null und die Sollvorgabe für eine Position des Aufhängungspunkts (AUP) als eine abhängig von der vorgegebenen Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts (AUP) bestimmten Position vorgegeben wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei bei Vorgabe aller Sollgrößen von null, die Pendelschwingungsdämpfung für eine vorbestimmte Nachlaufzeit aktiv bleibt.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Zustandsregelung betrieben wird oder betreibbar ist, um eine Störgrößenausgleichsfunktion zu realisieren, wobei

der Zustandsregelung kontinuierlich eine Sollvorgabe zu der Position des Aufhängungspunkts (AUP), die abhängig von einer gespeicherten absoluten Position der Last bestimmt wird, und einer Sollvorgabe der Geschwindigkeit des Aufhängungspunkts (AUP) von Null vorgegeben werden und die Lastposition (φ_x, φ_y) und die Lastgeschwindigkeit (φ'_x, φ'_y) des Masseschwerpunkts des Lastsystems unberücksichtigt bleiben, insbesondere indem die entsprechenden Regelabweichungen der Lastposition (φ_x, φ_y) und die Lastgeschwindigkeit (φ'_x, φ'_y) des Masseschwerpunkts des Lastsystems während der aktivierten Störgrößenausgleichsfunktion auf null gesetzt werden, wobei insbesondere die Sollvorgabe der Angabe zu der Position des Aufhängungspunktes (AUP) basierend auf der aktuellen Lastposition (φ_x, φ_y) des Masseschwerpunkts, einer Pendellänge (l) des Lastsystems und der aktuellen Position des Aufhängungspunktes (AUP) bestimmt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die Störgrößenausgleichsfunktion mithilfe eines zweiten Bedienelements (930) aktivierbar und deaktivierbar ist und insbesondere bei einem aktiven Kranbetrieb zum Lasttransport deaktiviert wird, wobei insbesondere bei Aktivieren der Störgrößenausgleichsfunktion die absolute Position der Last (L) gespeichert wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die Zustandsregelung betrieben wird oder betreibbar ist, um eine Positionierfunktion auszuführen, wobei der Zustandsregelung als Sollvorgaben die Angabe zu der Lastposition (φ_x, φ_y) und der Lastgeschwindigkeit (φ'_x, φ'_y) des Masseschwerpunkts des Lastsystems von Null vorgegeben werden und die Position (x, θ) und die Geschwindigkeit (x', θ') des Aufhängungspunkts (AUP) unberücksichtigt bleiben, insbesondere indem die entsprechenden Regelabweichungen während der aktivierten Positionierfunktion oder das zugehörige Element (Faktor) des Regelungsvektors K auf null gesetzt werden.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Zustandsregelung betrieben wird oder betreibbar ist, um eine Lastanhebefunktion zu realisieren, wenn eine Last (L) angehoben werden soll, wobei die Angabe zu der Lastposition (φ_x, φ_y) ermittelt wird, wenn eine Hubkraft auf das Hubseil (HSL) einen vorgegebenen Hubkraftschwellenwert übersteigt und die Last (L) noch nicht abgehoben ist, wobei die Zustandsregelung mit Sollvorgaben für die Lastposition (φ_x, φ_y) und Lastgeschwindigkeit (φ'_x, φ'_y) und der Geschwindigkeit (x', θ') des Aufhängungspunkts (AUP) von Null durchgeführt wird, wobei die Regelabweichung zur Position (x, θ) des Aufhängungspunkts (AUP) unberücksichtigt bleibt, insbesondere indem die entsprechende Regelabweichungen

oder das zugehörige Element (Faktor) eines/des Regelungsvektors K während der aktivierten Lastanhebefunktion auf null gesetzt werden.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die Zustandsregelung betrieben wird oder betreibbar ist, um eine Positionsanfahrfunktion zu realisieren, bei der eine gespeicherte Position angefahren und die Last (L) dort zum Stillstand gebracht wird, wobei entsprechend einem Nutzerwunsch eine aktuelle Position gespeichert wird, wobei die Zustandsregelung mit einer Sollvorgabe für die Position (x, θ) des Aufhängungspunkts (AUP), die der gespeicherten Position entspricht, einer Sollvorgabe für die Geschwindigkeit $(\dot{x}, \dot{\theta})$ des Aufhängungspunkts (AUP) von Null, einer Sollvorgabe für die Lastposition (φ_x, φ_y) und die Lastgeschwindigkeit $(\dot{\varphi}_x, \dot{\varphi}_y)$ von Null durchgeführt wird, sobald sich die Position des Aufhängungspunkts (AUP) im laufenden Kranbetrieb der gespeicherten Position des Aufhängungspunkts (AUP) insbesondere unter einen vorgegebenen Schwellenabstand angenähert hat.
12. Vorrichtung, insbesondere Steuergerät (100), zum Betreiben eines Auslegerdrehkrans (2) mithilfe einer Zustandsregelung, wobei die Zustandsregelung eine Regelung einer Bewegung einer angehängten Last (L) zumindest in einer Bewegungsrichtung bewirkt, und auf einem Zustandsvektor basiert, wobei die Vorrichtung ausgebildet ist zum:
 - Erfassen von Zustandsgrößen des Zustandsvektors, der Angaben zu einer Position und einer Geschwindigkeit $(\dot{x}, \dot{\theta})$ eines bewegbaren Aufhängungspunkts (AUP), an den ein Lastsystem, das ein Hubseil (HSL), eine an einem unteren Ende des Hubseils (HSL) angeordnete Lastaufnahmeeinrichtung (UF) und eine unterhalb der Lastaufnahmeeinrichtung (UF) angehängte Last (L) umfasst, angehängt ist, und Angaben zu einer Lastposition (φ_x, φ_y) und einer Lastgeschwindigkeit $(\dot{\varphi}_x, \dot{\varphi}_y)$ eines Masseschwerpunkts des Lastsystems bezüglich des Aufhängungspunkts (AUP) umfassen,
 - Ermitteln mindestens einer Stellgröße $(u_{LK}^*, u_{DW}^*, u_{HW}^*)$ zur Bewegung des Aufhängungspunktes (AUP) in der zumindest einen Bewegungsrichtung basierend auf der Zustandsregelung;
 - Ansteuern des Auslegerdrehkrans (2) abhängig von der mindestens einen Stellgröße $(u_{LK}^*, u_{DW}^*, u_{HW}^*)$.
13. Auslegerdrehkran (2) umfassend:
 - eine oder mehrere Antriebseinrichtungen zum Bewegen eines Aufhängungspunktes für ein Lastsystem;

- die Vorrichtung nach Anspruch 12, wobei der Auslegerdrehkran (2) durch Ansteuern der einen oder der mehreren Antriebseinrichtungen (LW, DW) angesteuert wird.
14. Computerprogrammprodukt umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Programms durch mindestens eine Datenverarbeitungseinrichtung diese veranlassen, die Schritte des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11 auszuführen.
15. Maschinenlesbares Speichermedium, umfassend Befehle, die bei der Ausführung durch mindestens eine Datenverarbeitungseinrichtung diese veranlassen, die Schritte des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11 auszuführen.