

5 Wolffkran Holding AG

10

15

20

**Titel: Turmdrehkran, Verfahren und Steuerungseinheit zum Betreiben eines Turmdrehkrans,
Laufkatze und Katzfahrwerk**

25

Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen Turmdrehkran, ein Verfahren und eine Steuerungseinheit zum Betreiben eines Turmdrehkrans, eine Laufkatze für einen Turmdrehkran sowie ein Katzfahrwerk für einen Turmdrehkran.

30 Es werden Fortschritte im Bereich der Turmdrehkrane beschrieben.

Die Probleme des Standes der Technik werden durch einen Turmdrehkran gemäß dem Anspruch 1, durch ein Verfahren und eine Steuerungseinheit zum Betreiben eines Turmdrehkrans gemäß nebengeordneter Ansprüche, eine Laufkatze für einen Turmdrehkran gemäß einem weiteren nebengeordneten Anspruch sowie ein Katzfahrwerk für einen Turmdrehkran gemäß einem anderen nebengeordneten Anspruch gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen finden sich in den

35 Unteransprüchen, der nachfolgenden Beschreibung und in der Zeichnung.

Ein erster Aspekt der Beschreibung betrifft einen Turmdrehkran, welcher umfasst: einen Turm mit einer Hochachse; einen vom Turm abragenden Katzausleger; ein Drehwerk zum Drehen zumindest des Katzauslegers um die Hochachse; eine Sensoreinrichtung zur Ermittlung eines Drehwinkels des Katzauslegers um die Hochachse; eine entlang des Katzauslegers verfahrbare Laufkatze mit wenigstens einer ersten und einer zweiten Umlenkrolle für ein Hubseil; ein Lastaufnahmemittel mit wenigstens einer Umlenkrolle für das Hubseil; eine an dem Lastaufnahmemittel angeordnete Sensoreinrichtung zur Ermittlung wenigstens eines ersten Auslenkungswinkels des Lastaufnahmemittels zum durch das Lastaufnahmemittel verlaufenden Lot; das Hubseil, welches ausgehend von einem Hubwerk wenigstens über die erste Umlenkrolle der Laufkatze, die wenigstens eine Umlenkrolle des Lastaufnahmemittels und die zweite Umlenkrolle der Laufkatze geführt ist, und welches an einem distalen Abschnitt des Katzauslegers befestigt ist; das Hubwerk; eine an der Laufkatze angeordnete

40

Sensoreinrichtung zur Ermittlung wenigstens eines zweiten Auslenkungswinkels wenigstens eines zwischen der Laufkatze und dem Lastaufnahmemittel befindlichen Abschnitts des Hubseils zum durch die Laufkatze verlaufenden Lot; ein Katzfahrwerk, welches mittels eines Katzseils mit der Laufkatze zu deren Bewegung entlang des Katzauslegers verbunden ist; eine Sensoreinrichtung zur Ermittlung einer Drehwinkeldifferenz zwischen dem Drehwinkel des Katzauslegers um die Hochachse und dem Drehwinkel der Laufkatze um die Hochachse; und einer Steuerungseinheit, welche das Drehwerk, das Hubwerk und das Katzfahrwerk in Abhängigkeit von wenigstens dem Drehwinkel, in Abhängigkeit von dem wenigstens einen ersten Auslenkungswinkel, in Abhängigkeit von dem wenigstens einen zweiten Auslenkungswinkel und in Abhängigkeit von der Drehwinkeldifferenz betreibt.

Der bereitgestellte Turmdrehkran ermöglicht es über die bereitgestellten Sensorgrößen, die Lastposition präzise und in Echtzeit während des Kranbetriebs zu ermitteln, um eine Pendelbewegung der Last zu reduzieren. Der vorgeschlagene Turmdrehkran bildet die Basis für die Zusammenführung, Aufbereitung und rechnerische Verarbeitung von Sensordaten, um ein präzises Ist-Lagebild zu ermitteln. Schätzungen wichtiger, zu regelnder Größen wie die von Winkeln wird durch Sensordatenfusion vermieden, wie auch evtl. auftretende Fehler einzelner Sensordaten werden durch die Datenfusion ausgeglichen. Zur Sensorfusion werden an der Laufkatze, dem Lastaufnahmemittel und auf dem Ausleger mittels der Sensorvorrichtungen unterschiedliche Daten ermittelt.

Bewegt der Kranfahrer die Last über einen Joystick, so muss er nicht mehr manuell versuchen, die sonst entstehenden Pendelbewegungen zu reduzieren. Es kann also ein Assistenzsystem bereitgestellt werden, dass es vorteilhaft ermöglicht, die Last mit einer hohen Geschwindigkeit gefahren werden kann, ohne dass der Kranfahrer auf ein Aufpendeln der Last Rücksicht nehmen müsste. Mit dem vorgeschlagenen Kran können also Lasten schneller abgesenkt werden, was sich zeitlich vorteilhaft auf die Arbeitsprozesse auf der Baustelle auswirkt.

Ein vorteilhaftes Beispiel zeichnet sich dadurch aus, dass die Sensoreinrichtung zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz feststehend zum Katzausleger, insbesondere an dem Katzausleger oder an einem Gestell des Katzfahrwerks, angeordnet ist.

Durch die starre Verbindung mit dem Katzausleger wird erreicht, dass eine Messung der Drehwinkeldifferenz verbessert wird. Bei der Verbindung mit dem Gestell des Katzfahrwerks vereinfachen sich der Aufbau und die Montage des Turmdrehkrans.

Ein vorteilhaftes Beispiel zeichnet sich dadurch aus, dass ein von der Sensoreinrichtung zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz erzeugtes Sensorsignal einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung und einem Abschnitt des Katzseils, welcher sich zwischen einer proximalen zum Katzausleger feststehenden Umlenkrolle und der Laufkatze befindet, repräsentiert; wobei die Drehwinkeldifferenz mittels der Steuerungseinheit in Abhängigkeit von dem den Abstand repräsentierenden Sensorsignal ermittelt wird.

Verbiegungen des Katzauslegers wirken sich je nach Position der Laufkatze entlang des Katzauslegers auf die Drehposition der Laufkatze aus. Die Position des Abschnitts des Katzseils bildet einen Versatz der Laufkatze zu einem Drehwinkel um eine Hochachse des Turms ab. Somit lässt sich ohne weitere Sensorik die konkrete Drehposition der Laufkatze zur Hochachse ermitteln.

Ein vorteilhaftes Beispiel zeichnet sich dadurch aus, dass die Sensoreinrichtung zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz ausgehend vom Turm in einer ersten bzw. proximalen Hälfte, insbesondere im ersten bzw. proximalen Drittel, der Länge des Katzauslegers angeordnet ist.

- 5 Die Verbiegung des Katzauslegers spielt eine größere Rolle, je weiter die Laufkatze vom Turm entfernt ist. Ist die Laufkatze hingegen näher am Turm spielt die Verbiegung des Katzauslegers eine untergeordnete Rolle. Deshalb ist die vorgeschlagene Anordnung der Sensoreinrichtung in der ersten Hälfte bzw. im ersten Drittel vorteilhaft. Dies ermöglicht auch die Integration mit dem Katzfahrwerk.

- 1 0 Ein vorteilhaftes Beispiel zeichnet sich dadurch aus, dass ein von der Sensoreinrichtung zur Ermittlung des wenigstens einen zweiten Auslenkungswinkels erzeugtes Sensorsignal einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung und dem wenigstens einen Abschnitt des Hubseils repräsentiert; und wobei der wenigstens eine zweite Auslenkungswinkel mittels der Steuerungseinheit in Abhängigkeit von dem den Abstand repräsentierenden Sensorsignal ermittelt wird.

Vorteilhaft kann durch die Abstandsmessung auf einfache Art und Weise die Messung des wenigstens einen zweiten Auslenkwinkels erfolgen.

- 1 5 Ein vorteilhaftes Beispiel zeichnet sich dadurch aus, dass der Turmdrehkran umfasst: eine weitere an der Laufkatze angeordnete Sensoreinrichtung zur Ermittlung wenigstens eines Neigungswinkels der Laufkatze zu einer Horizontalen; und wobei die Steuerungseinheit das Drehwerk, das Hubwerk und das Katzfahrwerk zusätzlich in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Neigungswinkel betreibt.

- 2 0 Durch die nicht lineare Biegung einzelner Auslegersegmente des Katzauslegers kann man den Neigungswinkel nur schwer durch einfache mathematische Linearisierungen herleiten. Die vorgeschlagene sensorische Erfassung des Neigungswinkels verbessert die Genauigkeit der nachgelagerten Regelung.

- 2 5 Ein zweiter Aspekt der Beschreibung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Turmdrehkrans umfassend: Ermitteln wenigstens eines ersten Pendelwinkels, welcher eine Auslenkung eines virtuellen Schwerpunkts eines an der Laufkatze aufgehängten Mehrfachpendels zu einem durch die Laufkatze verlaufenden Lot in einer ersten Raumbene charakterisiert; Ermitteln wenigstens eines zweiten Pendelwinkels, welcher eine Auslenkung des Schwerpunkts des Mehrfachpendels zu dem durch die Laufkatze verlaufenden Lot in einer zweiten Raumbene charakterisiert; Ermitteln wenigstens eines Drehwinkels der Laufkatze um die Hochachse des Turms; und Ermitteln wenigstens einer Stellgröße zum Betreiben des Turmdrehkrans, insbesondere mittels wenigstens eines Drehwerks, wenigstens eines Hubwerks und wenigstens eines Katzfahrwerks, in Abhängigkeit von dem wenigstens einen ersten Pendelwinkel, in Abhängigkeit von dem wenigstens einen zweiten Pendelwinkel und in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Drehwinkel.

- 3 0 Durch die Ermittlung der Pendelwinkel und des Drehwinkels der Laufkatze wird es ermöglicht, auf die Lastposition zu schließen und eine echtzeitnahe Regelung anhand eines den Kran und die Lastbewegung abbildenden Regelungsmodells zu realisieren.

Der dargestellte Ansatz verzichtet vorteilhaft auf die Verwendung und Ableitung von Regelgröße. Vielmehr wird über die Pendelwinkel und den Drehwinkel der Laufkatze die tatsächliche Lastsituation am Kran und unterhalb des Kranauslegers

ermittelt. Mittels Sensorfusion werden die Einflüsse des in Kranoperationen in der Regel vorzufindenden Doppelpendels auf die Regelung der Lastbewegung zu reduziert bzw. zu eliminiert.

- 5 Durch das vorgeschlagene Verfahren erhält man – unabhängig von der Komplexität der mechanischen Ausführung der Anordnung unterhalb der Laufkatze - ein vereinfachtes virtuelles Einfachpendelsystem, das sich mit einfacheren und vor allem ohne die Ermittlung von Kranaufbau-spezifischen Torsion- und Biegemomenten auskommenden Regelalgorithmen betreiben lässt. Das vorgeschlagene Verfahren kann vorteilhaft für eine Vielzahl von unterschiedlichen Konfigurationen von Turmdrehkränen angewendet werden, ohne dass aufwendige Anpassungen des Verfahrens an die Konstruktion des Krans durchgeführt werden müssen.

- 1 0 Des Weiteren ermöglicht das vorgeschlagene Verfahren bzw. System zusätzlich zu einer positionsbezogenen Regelung der Last, also einer Vorgabe einer Trajektorie für die Last, die gleichzeitige Möglichkeit einer geschwindigkeitsbezogenen Regelung der Last. Dadurch ist diese mit der aktuell gängigen geschwindigkeitsbezogenen Kransteuerung mittels SPS vergleichbar und für die Kranfahrer zugänglicher. Die Kranfahrer geben bei der SPS Steuerung per Joystickbefehle eine Geschwindigkeit für die jeweiligen Antriebe vor. Bei der geschwindigkeits-bezogenen Regelung der Last würde der Kranfahrer per Joystickbefehl eine Geschwindigkeit der Last vorgeben. Dadurch kann also ein Assistenzsystem für den
- 1 5 Kranfahrer bereitgestellt werden. Auf der anderen Seite ermöglicht das vorgeschlagene Verfahren bzw. System eine vollautomatisierte Fahrt. Somit ist das hier vorgeschlagene System sowohl für eine intuitivere manuelle als auch für eine semi- bzw. vollautomatisierte Steuerung einsetzbar und stellt die hierzu nötige Basis bereit.

- 2 0 Ein vorteilhaftes Beispiel umfasst: Ermitteln eines in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels wenigstens eines zwischen der Laufkatze und dem Lastaufnahmemittel befindlichen Abschnitts des Hubseils zum durch die Laufkatze verlaufenden Lot; Ermitteln eines in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels des Lastaufnahmemittels, welches über das Hubseil an der Laufkatze hängt, zum durch das Lastaufnahmemittel verlaufenden Lot; wobei der erste Pendelwinkel in Abhängigkeit von dem in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkel des wenigstens einen Abschnitts des Hubseils und in Abhängigkeit von dem in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels des Lastaufnahmemittels ermittelt wird.

- 2 5 Durch diese Sensorfusion wird die präzise Ermittlung des Pendelwinkels verbessert. Unerwünschte Schwindungen in den Sensorsignalen werden durch die Sensorfusion reduziert.

- 3 0 Ein vorteilhaftes Beispiel umfasst: Ermitteln eines ersten Gewichtungsfaktors in Abhängigkeit von einer Pendellänge; wobei der erste Pendelwinkel durch Gewichtung des in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels des Abschnitts des Hubseils in Abhängigkeit von dem ersten Gewichtungsfaktor und durch Gewichtung des in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels des Lastaufnahmemittels in Abhängigkeit von dem ersten Gewichtungsfaktor ermittelt wird.

Vorteilhaft wird die Pendellänge dazu genutzt, um durch die Konstruktion der Laufkatze und des Lastaufnahmemittels bei unterschiedlichen Pendellängen entstehende Schwindungen für die Ermittlung der Stellgrößen zu reduzieren.

- 3 5 Ein vorteilhaftes Beispiel umfasst: Ermitteln eines Neigungswinkels der Laufkatze zur Horizontalen; Ermitteln eines in der ersten Ebene liegenden kompensierten Auslenkungswinkels in Abhängigkeit von dem Neigungswinkel der Laufkatze und in Abhängigkeit von dem in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkel des wenigstens einen Abschnitts des Hubseils; wobei der erste Pendelwinkel in Abhängigkeit von dem in der ersten Ebene liegenden kompensierten Auslenkungswinkel

des wenigstens einen Abschnitts des Hubseils und in Abhängigkeit von dem in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels des Lastaufnahmemittels ermittelt wird.

Durch diese Sensorfusion wird die Verbiegung des Katzauslegers, die sich je nach Position der Laufkatze, der Last und der Konstruktion des Katzauslegers unterscheidet, präzise berücksichtigt.

- 5 Ein vorteilhaftes Beispiel umfasst: Ermitteln eines in der zweiten Ebene liegenden Auslenkungswinkels des wenigstens einen zwischen der Laufkatze und dem Lastaufnahmemittel befindlichen Abschnitts des Hubseils zum durch die Laufkatze verlaufenden Lot; Ermitteln eines in der zweiten Ebene liegenden Auslenkungswinkels des Lastaufnahmemittels, welches über das Hubseil an der Laufkatze hängt, zum durch das Lastaufnahmemittel verlaufenden Lot; und wobei der zweite Auslenkungswinkel in Abhängigkeit von dem in der zweiten Ebene liegenden Auslenkungswinkel und in Abhängigkeit von dem in der zweiten Ebene liegenden Auslenkungswinkel des Lastaufnahmemittels ermittelt wird.

Durch diese Sensorfusion wird die präzise Ermittlung des Pendelwinkels verbessert. Unerwünschte Schwindungen in den Sensorsignalen werden durch die Sensorfusion reduziert.

- 1 5 Ein vorteilhaftes Beispiel umfasst: Ermitteln eines zweiten Gewichtungsfaktors in Abhängigkeit von der Pendellänge; und wobei der zweite Auslenkungswinkel durch Gewichtung des in der zweiten Ebene liegenden Auslenkungswinkels des wenigstens einen Abschnitts des Hubseils in Abhängigkeit von dem zweiten Gewichtungsfaktor und durch Gewichtung des in der zweiten Ebene liegenden Auslenkungswinkels des Lastaufnahmemittels in Abhängigkeit von dem zweiten Gewichtungsfaktor ermittelt wird.

Vorteilhaft wird die Pendellänge dazu genutzt, um durch die Konstruktion der Laufkatze und des Lastaufnahmemittels bei unterschiedlichen Pendellängen entstehende Schwindungen für die Ermittlung der Stellgrößen zu reduzieren.

- 2 0 Ein vorteilhaftes Beispiel umfasst: Ermitteln einer Länge eines der Abschnitte des Hubseils zwischen der Laufkatze und dem Lastaufnahmemittel; und Ermitteln der Pendellänge in Abhängigkeit von der Länge eines der Abschnitte des Hubseils und einer vorab festgelegten und insbesondere manuell während des Betriebs vorgebbaren Länge eines Lastseils zwischen dem Lastaufnahmemittel und der Last.

- 2 5 Durch die vorgegebene Länge des Lastseils wird die Ungenauigkeit bei der Ermittlung der Gesamtlänge des Mehrfachpendels kompensiert. Dadurch wird der Gesamtfehler reduziert. Solange der Gesamtfehler im Bereich von ca. $\pm 10\%$ der Gesamtlänge des Mehrfachpendels bleibt, wird eine ausreichend gedämpfte Regelung gewährleistet. Dieses Verhalten der an dem Lastaufnahmemittel mittels Anschlagmittel befestigten Last wurde empirisch durch Testversuche belegt.

- 3 0 Wenn die Länge des Abschnitts des Hubseils 40m und die Länge des Lastseils 5m betragen, ergibt sich eine Gesamtlänge von 45m. Der Regler kann somit eine Ungenauigkeit von $\pm 4,5\text{m}$ ohne weiteres tolerieren. In den überwiegenden Fällen führt dieses zu dem gewünschten Regelverhalten. Ein Überschreiten dieser Toleranz führt zwar zu einem leichten Überschwingen, das aber immer noch kleiner ausfällt als es ohne die vorgeschlagene Regelung der Fall wäre.

Ein vorteilhaftes Beispiel umfasst: Ermitteln eines Drehwinkels des Katzauslegers um die Hochachse; Ermitteln einer Drehwinkeldifferenz zwischen dem Drehwinkel des Katzauslegers um die Hochachse und dem Drehwinkel der Laufkatze

um die Hochachse; und wobei der Drehwinkel der Laufkatze um die Hochachse des Turms in Abhängigkeit von dem Drehwinkel des Katzauslegers und in Abhängigkeit von der Drehwinkeldifferenz ermittelt wird.

Durch diese Sensorfusion wird die präzise Ermittlung des Drehwinkels der Laufkatze verbessert.

- 5 Ein vorteilhaftes Beispiel zeichnet sich dadurch aus, dass die Ermittlung der wenigstens einen Stellgröße dann aktiviert wird, wenn wenigstens eine der folgenden Bedingungen eintritt: Vorliegen wenigstens einer Soll-Größe ungleich Null; Vorliegen einer von einer Bedieneinheit stammenden manuellen Aktivierung der Ermittlung der wenigstens einen Stellgröße; und Vorliegen einer Anforderung zur Nachregelung.

- 1 0 Ein vorteilhaftes Beispiel umfasst: Aktualisieren eines Modells, insbesondere von das Modell charakterisierenden Matrizen, in Abhängigkeit von der Pendellänge, einer Position der Laufkatze und in Abhängigkeit von, insbesondere mittels einer Sensoreinrichtung ermittelten mit dem Mehrfachpendel assoziierten Masse; und wobei das Ermitteln der wenigstens einen Stellgröße in Abhängigkeit von dem aktualisierten Modell durchgeführt wird.

Vorteilhaft ermöglichen die Position der Laufkatze, die gemessene Masse und die Pendellänge eine Aktualisierung des Modells.

- 1 5 Ein vorteilhaftes Beispiel umfasst: Aktualisieren eines Reglers, insbesondere von Verstärkungsfaktoren, in Abhängigkeit von dem Modell, insbesondere von den das Modell charakterisierenden Matrizen, und in Abhängigkeit von der Pendellänge; und wobei das Ermitteln der wenigstens einen Stellgröße in Abhängigkeit von dem aktualisierten Regler durchgeführt wird.

- 2 0 Ein dritter Aspekt der Beschreibung betrifft eine Steuerungseinheit zum Betreiben eines Turmdrehkrans umfassend: Mittel zur Ermittlung wenigstens eines ersten Pendelwinkels, welcher eine Auslenkung eines virtuellen Schwerpunkts eines an einer Laufkatze aufgehängten Mehrfachpendels zu einem durch die Laufkatze verlaufenden Lot in einer ersten Raumbene charakterisiert; Mittel zur Ermittlung wenigstens eines zweiten Pendelwinkels, welcher eine Auslenkung des Schwerpunkts des Mehrfachpendels zu dem durch die Laufkatze verlaufenden Lot in einer zweiten Raumbene charakterisiert; Mittel zur Ermittlung wenigstens eines Drehwinkels der Laufkatze um die Hochachse des Turms; und Mittel zur Ermittlung wenigstens einer Stellgröße zum Betreiben des Turmdrehkrans, insbesondere mittels wenigstens eines Drehwerks, wenigstens eines Hubwerks und wenigstens eines Katzfahrwerks des Turmdrehkrans, in Abhängigkeit von dem wenigstens einen ersten Pendelwinkel, in Abhängigkeit von dem wenigstens einen zweiten Pendelwinkel und in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Drehwinkel.

- 3 0 Ein vierter Aspekt der Beschreibung betrifft eine Laufkatze für einen Turmdrehkran umfassend: ein Fahrgestell zum Verfahren der Laufkatze entlang eines Katzauslegers; wenigstens zwei zum Fahrgestell feststehend angeordnete Umlenkrollen zum Umlenken eines Hubseils in Richtung eines Lastaufnahmemittels; und eine zum Fahrgestell feststehend angeordnete Sensoreinrichtung zur Ermittlung wenigstens eines Auslenkungswinkels eines zwischen der Laufkatze und einem Lastaufnahmemittel befindlichen Abschnitts des Hubseils zum durch die Laufkatze verlaufenden Lot.

Die Ermittlung des wenigstens einen Auslenkungswinkels des Hubseils an der Laufkatze ermöglicht, die Lastsituation präzise zu ermitteln.

- 3 5 Ein vorteilhaftes Beispiel zeichnet sich dadurch aus, dass wenigstens ein von der Sensoreinrichtung erzeugtes Sensorsignal einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung und wenigstens einem Abschnitt des Hubseils repräsentiert.

Durch die Ermittlung des Abstandes kann der Auslenkungswinkel präziser bestimmt werden – insbesondere im Vergleich zu einer Kameramessung.

Ein vorteilhaftes Beispiel zeichnet sich dadurch aus, dass dem wenigstens einen Abschnitt des Hubseils wenigstens zwei Sensoren zugeordnet sind, welche aus unterschiedlichen Winkeln auf den Abschnitt des Hubseils gerichtet sind.

- 5 Durch zwei voneinander beabstandete Sensoren wird sowohl die Messung an sich verbessert, als auch eine Fehlerbehandlung bei nicht konsistenten Sensorsignalen ermöglicht.

Ein vorteilhaftes Beispiel zeichnet sich dadurch aus, dass die Sensoreinrichtung zumindest zu einem Teil zwischen den wenigstens zwei Abschnitten des Hubseils angeordnet ist.

- 1 0 Dadurch wird eine kompaktere Sensoreinrichtung bereitgestellt. Des Weiteren ist diese geschützt in einem proximalen Bereich der Laufkatze angeordnet. Darüber hinaus können einzelne Sensoren zu einer Einheit integriert werden.

Ein vorteilhaftes Beispiel umfasst: wenigstens eine weitere zum Fahrgestell feststehend angeordnete Sensoreinrichtung zur Erzeugung wenigstens eines weiteren Sensorsignals, welches eine Neigung der Laufkatze zu einer Horizontalen charakterisiert.

- 1 5 Vorteilhaft kann durch Sensorfusion auf diese Weise die präzise Ermittlung des in einer Ebene, die Turm und Katzausleger aufspannen, liegenden Auslenkungswinkels verbessert werden.

- 2 0 Ein fünfter Aspekt der Beschreibung betrifft ein Katzfahrwerk zur Anordnung an einem Katzausleger eines Turmdrehkrans umfassend: ein Gestell; eine zum Gestell feststehend angeordnete Antriebseinheit zum Auf- und Abrollen eines Katzseils; und eine zum Gestell feststehend angeordnete Sensoreinrichtung zur Ermittlung einer Drehwinkeldifferenz zwischen einem Drehwinkel des Katzauslegers um eine Hochachse eines Turms des Turmdrehkrans und einem Drehwinkel der Laufkatze um die Hochachse.

Vorteilhaft wird die Sensoreinrichtung zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz in das Katzfahrwerk integriert. Damit muss die Sensoreinrichtung nicht separat an dem Katzausleger angeordnet werden. Folglich vereinfacht sich der Aufbau des Krans.

- 2 5 Ein vorteilhaftes Beispiel zeichnet sich dadurch aus, dass ein von der Sensoreinrichtung erzeugtes Sensorsignal zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung und einem Abschnitt des Katzseils repräsentiert.

Verbiegungen des Katzauslegers wirken sich je nach Position der Laufkatze entlang des Katzauslegers auf die Drehposition der Laufkatze aus. Die Position des Abschnitts des Katzseils bildet einen Versatz der Laufkatze zu einem Drehwinkel um eine Hochachse des Turms ab. Somit lässt sich ohne weitere Sensorik die konkrete Drehposition der Laufkatze zur Hochachse ermitteln.

- 3 0 In der Zeichnung zeigen:

Figur 1 einen Turmdrehkran in schematischer Form;

Figuren 2, 3, 16 und 19

jeweils ein Pendelsystem;

- Figur 4 eine Rückführung von Sensorsignalen;
- Figuren 5 und 6 jeweils eine Ermittlung von Stellgrößen;
- Figuren 7 und 10 jeweils eine Laufkatze in schematischer Form;
- Figuren 8 und 11 jeweils eine Bestimmung der Position eines Abschnitts eines Hubseils mittels einer Sensoreinrichtung;
- Figur 9 die Laufkatze und verschiedene Positionen einer Umlenkrolle eines Lastaufnahmemittels;
- Figur 12 die Laufkatze und Teile einer Sensoreinrichtung;
- Figur 13 einen durch Verbiegung des Katzauslegers erzeugten Neigungswinkel der Laufkatze zu einer Horizontalen;
- Figur 14 eine durch Verbiegung des Katzauslegers erzeugte Drehwinkeldifferenz zwischen einem Drehwinkel der Laufkatze und einem Drehwinkel des Katzauslegers;
- Figuren 15 und 17 jeweils einen Signalflussplan;
- Figur 18 den Turmdrehkran in einer Draufsicht; und
- Figur 20 eine Steuerungseinheit zum Betreiben des Turmdrehkrans.
- Figur 1 zeigt in einer schematischen Seitenansicht einen Turmdrehkran 2 zum Anheben, Verfahren und Absetzen einer Last L. 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 beispielsweise auf einem Gegenausleger GA angeordnetes Drehwerk DW zum Drehen zumindest des Katzauslegers KA um die Hochachse H. Der Turmdrehkran 2 umfasst eine beispielsweise als Drehwinkelsensor ausgebildete Sensoreinrichtung 510 zur Ermittlung eines Drehwinkels θ_u des Katzauslegers KA um die Hochachse H in einer yx-Ebene.
- Eine entlang des Katzauslegers KA verfahrbare Laufkatze LK umfasst eine ersten und einer zweite Umlenkrolle 202, 204 zum Umlenkgen eines Hubseils HSL in Richtung eines Lastaufnahmemittels UF, welches auch als Unterflasche oder Hakenflasche bezeichnenbar ist. Das Lastaufnahmemittel UF umfasst wenigstens eine Umlenkrolle 302 für das Hubseil HSL, kann aber auch eine Mehrzahl von Umlenkrollen für das Hubseil HSL umfassen.
- Eine an dem Lastaufnahmemittel UF angeordnete beispielsweise als Gyroskop ausgebildete Sensoreinrichtung 310 ist zur Ermittlung eines ersten Auslenkungswinkels φ_{2x} , φ_{2y} des Lastaufnahmemittels UF zum durch das Lastaufnahmemittel UF verlaufenden Lot eingerichtet.

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

5 Das Hubwerk HW umfasst eine Bremse, einen Elektromotor, ein Getriebe und eine Seilwinde. Auf die Seilwinde des Hubwerks HW wird das Hubseil HSL aufgerollt, um die Last L anzuheben, und es wird abgerollt, um die Last L abzusinken. 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.

1 0 Eine Sensoreinrichtung 620 ist gemäß Figur 1 mit der Umlenkrolle 22 gekoppelt und erfasst deren Auslenkung in der xy-Ebene, die sich abhängig von der Masse m der angehängten Last L bzw. des Mehrfachpendels unterhalb der Laufkatze LK verändert. Die Sensoreinrichtung 620 misst beispielsweise eine Zugkraft, die auf die Umlenkrolle 22 ausgeübt wird. Ein von der Sensoreinrichtung 620 ermitteltes Sensorsignal repräsentiert die Masse M.

1 5 Eine an der Laufkatze LK angeordnete Sensoreinrichtung 210 ist zur Ermittlung eines zweiten Auslenkungswinkels φ_{1y} , φ_{ux} eines zwischen der Laufkatze LK und dem Lastaufnahmemittel UF befindlichen Abschnitts HSL#1, HSL#2 des Hubseils HS zum durch die Laufkatze LK verlaufenden Lot eingerichtet. Ein von der Sensoreinrichtung 210 zur Ermittlung des zweiten Auslenkungswinkels φ_{1y} , φ_{ux} erzeugtes Sensorsignal repräsentiert einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung 210 und dem Abschnitt HSL#1, HSL#2 des Hubseils HSL. Der zweite Auslenkungswinkel φ_{1y} , φ_{ux} wird mittels der Steuerungseinheit 100 in Abhängigkeit von dem den Abstand repräsentierenden Sensorsignal der Sensoreinrichtung 210 ermittelt.

2 0 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.

2 5 Feststehend zu dem Gestell 402 ist eine Sensoreinrichtung 420, beispielsweise ein Drehwinkelsensor, der die Umdrehungen zählt, angeordnet, welche ein Sensorsignal erzeugt, das die Position x der Laufkatze LK charakterisiert.

3 0 Eine Sensoreinrichtung 410 ist zur Ermittlung einer Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ zwischen dem Drehwinkel θ_u des Katzauslegers KA um die Hochachse H und dem Drehwinkel der Laufkatze LK um die Hochachse H eingerichtet. Die Sensoreinrichtung 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. Ein von der Sensoreinrichtung 410 zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ erzeugtes Sensorsignal repräsentiert einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung 410 und einem Abschnitt KSL#1 des Katzseils KSL, 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 $\Delta\theta$ wird mittels der Steuerungseinheit 100 in Abhängigkeit von dem den Abstand repräsentierenden Sensorsignal ermittelt. Die
3 5 Sensoreinrichtung 410 ist ausgehend vom Turm T in einer ersten bzw. proximalen Hälfte, insbesondere im ersten bzw. proximalen Drittel, der Länge des Katzauslegers KA angeordnet ist.

Die Anordnung der Sensoreinrichtung 410 zur Ermittlung einer Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ ist in Figur 1 aus Übersichtlichkeitsgründen schematisch parallel zur Hochachse z beabstandet zum Katzseil KSL dargestellt. In der im vorigen Absatz erläuterten Ausführungsform ist die Sensoreinrichtung 410 lotrecht zur Zeichenebene vom Katzsteil KSL beabstandet angeordnet. Selbstverständlich sind auch andere Ausführungsformen der Sensoreinrichtung 410 denkbar, beispielsweise ein wie abgebildet angeordneter Sensor, der die Auslenkung des Katzseils KSL von vertikal oben oder von vertikal unten beispielsweise optisch beobachtet und das die Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ repräsentierende Signal ermittelt.

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 Sensoreinrichtung 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 Drehwinkel θ der Laufkatze LK um die Hochachse H eingerichtet. Das von der Sensoreinrichtung 410 erzeugte Sensorsignal zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ repräsentiert einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung 410 und einem Abschnitt KSL#1 des Katzseils KSL.

Eine Steuerungseinheit 100 betreibt das Drehwerk DW, das Hubwerk HW und das Katzfahrwerk KW in Abhängigkeit von dem Drehwinkel θ_u , in Abhängigkeit von dem ersten Auslenkungswinkel φ_{2x} , φ_{2y} , in Abhängigkeit von dem zweiten Auslenkungswinkel φ_{1y} , φ_{ux} und in Abhängigkeit von der Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$.

Eine weitere an der Laufkatze LK, insbesondere zu deren Fahrgestell feststehend angeordnete, beispielsweise als Gyroskop ausgebildete Sensoreinrichtung 220 dient zur Ermittlung eines Neigungswinkels $\Delta\varphi$ der Laufkatze LK zu einer Horizontalen. Die Sensoreinrichtung 220 ermittelt ein Sensorsignal, welches eine Neigung der Laufkatze LK zu einer Horizontalen, insbesondere einen in einer xh-Ebene, welche von Hochachse und Längsachse des Katzauslegers aufgespannt wird, liegenden Neigungswinkel zu einer Horizontalebene, charakterisiert. Die Steuerungseinheit 100 betreibt das Drehwerk DW, das Hubwerk HW und das Katzfahrwerk KW zusätzlich in Abhängigkeit von dem Neigungswinkel $\Delta\varphi$.

Das an der Laufkatze LK aufgehängte Mehrfachpendel wird in den nachfolgenden Figuren 2 und 3 erläutert und umfasst die zwei Abschnitte HSL#1, HSL#2 des Hubseils HSL, das das an dem Hubseil HSL hängende Lastaufnahmemittel UF, ein an dem Lastaufnahmemittel UF angeordnetes Lastseil LSL und die an dem Lastseil LSL angeordnete Last L. Bei einem Zweikatzbetrieb gilt entsprechendes, wobei durch die mehrfache Einscherung des Hubseils das darunter befindliche Pendel drei oder mehr Umlenkrollen an den Katzen als auslegerseitige Bezugspunkte erhält. Unter einem Mehrfach- bzw. Doppelpendel wird in diesem Zusammenhang die unterhalb der Laufkatze bzw. unterhalb der Umlenkrollen der Laufkatze befindliche Anordnung verstanden.

Eine Länge l_1 wird mittels eines Sensors 610, beispielsweise eines Drehwinkelsensors, der Umdrehungen zählt, ermittelt, der dem Hubwerk HW zugeordnet ist. Beispielsweise kann über die Erfassung der Drehposition des Hubwerks HW auf den Abstand zwischen dem Lastaufnahmemittel UF und der Laufkatze LK geschlossen werden.

Eine Länge l_k des Lastseils LSL zwischen dem Lastaufnahmemittel UF und der Last L ist beispielsweise über eine Bedieneinheit 900 vorgebbbar. Die Bedieneinheit 900 ist beispielsweise ein Steuerpult oder eine Funkfernbedienung. Mittels eines Joysticks der Bedieneinheit 900 werden implizit Sollgrößen S_{soll} an die Steuerungseinheit 100 übermittelt.

Figur 2 zeigt eine schematische Abbildung des bei dem Turmdrehkran aus der Figur 1 vorhandenen Doppelpendels. Bei diesem Doppelpendel, das sich aus allen Komponenten unterhalb der Laufkatze LK befindet, ergeben sich zwei Winkel φ_1 , φ_2 der Seile zum jeweiligen Lot und zwei Längen l_1 , l_2 der Seile.

Während l_1 und der Winkel φ_1 messtechnisch relativ einfach erfassbar sind, bleiben die Länge l_2 zwischen

- 5 Lastaufnahmemittel UF und der Last L sowie die Masse m der Last als auch ein Schwerpunkt S der Masse der Last im Betrieb stets variabel. Auch der Winkel φ_1 ist nicht trivial als Messgröße erfassbar. Und selbst wenn man die Länge l_2 schätzen würde, ergibt sich eine nicht unwesentliche Regelungsungenauigkeit, die das System bei aktiver Ansteuerung der Antriebe weiterhin zum Schwingen bringt.

- Figur 3 zeigt die in dieser Beschreibung vorgeschlagene Vereinfachung der Betrachtung des Mehrfachpendels zur
 1 0 Verhinderung bzw. Reduzierung einer Pendelbewegung. Das Mehrfachpendel aus Figur 2 wird als Einfachpendel betrachtet. Eine Größe dabei ist der Winkel der Auslenkung der Last gegenüber der Laufkatze. Dieser ist nicht mit einfacher Sensorik wie Kameras oder Ultraschallsensoren oder laserbasierten Abstandsmesssystemen zu erfassen, da ein
 1 5 eigentlicher Pendelwinkel φ in der Realität an keinem der physikalisch im Kranbetrieb vorzufindenden Objekte zu finden ist. Dieser Pendelwinkel φ wird auf Basis von Sensormessungen annähernd ermittelt. Die nachfolgend beschriebene Regelung basiert unter anderem auf der Betrachtung folgender Größen:

φ Pendelwinkel zwischen der zum virtuellen Schwerpunkt S der Last zeigenden Geraden und der dem Lot L#LK in der Mitte der Laufkatze LK;

l Abstand zwischen der Laufkatze und dem virtuellen Schwerpunkt S der virtuellen Last L;

S Virtueller Schwerpunkt der virtuellen Last L; und

- 2 0 m Masse der virtuellen Last L.

- Figur 4 zeigt in Anlehnung an Figur 1 die Ermittlung von Stellgrößen bzw. Stell-Drehzahlen u durch eine Ermittlungseinheit
 110. Die jeweilige Stelldrehzahl wird beispielsweise in % von der maximalen Drehzahl für den jeweiligen Antrieb vorgegeben. Der Ermittlungseinheit 110 werden zumindest die Sensordaten und Sollgrößen S'_{soll} zugeführt, um die
 Antriebsdrehzahlen u zu ermitteln. Eine Ermittlungseinheit 120 ermittelt die Soll-Größen S'_{soll} in Abhängigkeit von von der
 2 5 Bedieneinheit 900 stammenden Soll-Größen S_{soll} , wobei die einzelnen Soll-Größen S_{soll} mit einem Verstärkungsfaktor multipliziert werden.

- Weitergehend ist es möglich, über die Bedieneinheit 900 ein Signal ACT an die Ermittlungseinheit 110 abzugeben, welches die Ermittlungseinheit und die ausgeführte Regelung aktiviert. So können beispielsweise angehobene Lasten von Hand
 verschoben werden, wobei die Steuerungseinheit 100 den Turmdrehkran so ansteuert, dass dieser ein Aufpendeln der Last
 3 0 beim manuellen Verschieben verhindert.

- Figur 5 zeigt eine Ausführungsform der Ermittlungseinheit 110 aus Figur 4. Mittel 1002 sind zur Ermittlung eines ersten
 Pendelwinkels φ_x eingerichtet, welcher eine Auslenkung des virtuellen Schwerpunkts des an der Laufkatze aufgehängten
 Mehrfachpendels zu einem durch die Laufkatze verlaufenden Lot in einer ersten gedachten Raumebene xh , welche durch
 die Hochachse des Turms des Turmdrehkrans aufgespannt wird, charakterisiert. Mittel 1004 sind dazu eingerichtet, um
 3 5 einen zweiten Pendelwinkel φ_y zu ermitteln, welcher eine Auslenkung des Schwerpunkts des Mehrfachpendels zu dem

durch die Laufkatze verlaufenden Lot in einer zweiten gedachten Raumbene, welche eine Lotebene der ersten Raumbene x_h ist und parallel zur Hochachse H verläuft, charakterisiert. Mittel 1006 ermitteln den Drehwinkel θ der Laufkatze um die Hochachse des Turms in Abhängigkeit von dem Drehwinkel θ_u des Katzauslegers und in Abhängigkeit von der Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$.

- 5 Weitere Mittel 1010 dienen zur Ermittlung der Stellgröße u zum Betreiben des Turmdrehkrans, insbesondere des Drehwerks, des Hubwerk und des Katzfahrwerks, in Abhängigkeit von dem ersten Pendelwinkel φ_x , in Abhängigkeit von dem zweiten Pendelwinkel φ_y und in Abhängigkeit von dem Drehwinkel θ .

- Mittel 1024 sind eingerichtet, um die Pendellänge l in Abhängigkeit von der Länge l_1 der Abschnitte des Hubseils und der vorab festgelegten und insbesondere manuell während des Betriebs vorgebbaren Länge l_k des Lastseils zwischen dem
1 0 Lastaufnahmemittel und der Last ermitteln.

- Mittel 1012 sind dazu eingerichtet, einen ersten Gewichtungsfaktor k_x in Abhängigkeit von der Pendellänge l , wobei der erste Pendelwinkel φ_x durch Gewichtung des in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels φ_{ux} des Abschnitts HSL#1, HSL#2 des Hubseils HSL in Abhängigkeit von dem ersten Gewichtungsfaktor k_x und durch Gewichtung des in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels φ_{2x} des Lastaufnahmemittels UF in Abhängigkeit von dem ersten
1 5 Gewichtungsfaktor k_x ermittelt wird.

- Mittel 1014 sind dazu eingerichtet, einen in der ersten Ebene x_h liegenden kompensierten Auslenkungswinkels φ_{1x} in Abhängigkeit von dem Neigungswinkel $\Delta\varphi$ der Laufkatze und in Abhängigkeit von dem in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkel φ_{ux} des Abschnitts des Hubseils zu ermitteln, wobei die Mittel 1002 dazu eingerichtet sind, den ersten Pendelwinkel φ_x durch Gewichtung des in der ersten Ebene liegenden kompensierten Auslenkungswinkels φ_{ux} in
2 0 Abhängigkeit von dem ersten Gewichtungsfaktor k_x und durch Gewichtung des in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels φ_{2x} des Lastaufnahmemittels in Abhängigkeit von dem ersten Gewichtungsfaktors zu ermitteln.

- Mittel 1022 sind dazu eingerichtet, einen zweiten Gewichtungsfaktor k_y in Abhängigkeit von der Pendellänge l zu ermitteln, wobei die Mittel 1004 dazu eingerichtet sind, den zweite Auslenkungswinkel φ_y durch Gewichtung des in der zweiten Ebene y_h liegenden Auslenkungswinkel φ_{1y} des Abschnitts des Hubseils in Abhängigkeit von dem zweiten
2 5 Gewichtungsfaktor k_y und durch Gewichtung des in der zweiten Ebene y_h liegenden Auslenkungswinkels φ_{2y} des Lastaufnahmemittels UF in Abhängigkeit von dem zweiten Gewichtungsfaktor k_y zu ermitteln.

- Mittel 1030 sind dazu eingerichtet, ein Modell, insbesondere von das Modell charakterisierenden Matrizen A, B , in Abhängigkeit von der Pendellänge l , der Position x der Laufkatze und in Abhängigkeit von der mit dem Mehrfachpendel assoziierten Masse m zu aktualisieren. Mittel 1032 dienen zur Aktualisierung eines Reglers, wobei eine Matrix von
3 0 Verstärkungsfaktoren K' , in Abhängigkeit von dem Modell, insbesondere von den das Modell charakterisierenden Matrizen A, B , und in Abhängigkeit von der Pendellänge l ermittelt wird. Das Ermitteln der Stellgröße u_{LK} , u_{DW} , u_{HW} in Abhängigkeit von dem aktualisierten Regler durchgeführt wird.

Gemäß einem jeweiligen Block 1040, 1042, 1044, 1046 und 1048 wird eine jeweilige Ableitung $\dot{x}$, $\dot{l}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\varphi}_x$, $\dot{\varphi}_y$ der jeweils zugeführten Größe ermittelt. Alternativ kann die Größe $\dot{x}$ auch direkt zugeführt werden.

Das Mittel 1010 ermittelt die Stellgrößen u in Abhängigkeit von der Matrix K' , den Soll-Größen S'_{soll} , der Pendellänge l , den Pendelwinkeln, dem Drehwinkel der Laufkatze, und in Abhängigkeit von den Ableitungen x' , l' , θ' , φ'_x , φ'_y .

- Figur 6 zeigt ein weiteres Beispiel der Ermittlungseinheit 110. Im Unterschied zur Figur 5 umfasst die Ermittlungseinheit 110 einen Beobachter 130, dem die ermittelten gestellten Antriebsdrehzahlen u und Messsignale Z zugeführt werden. Der Beobachter ermittelt den Zustandsvektor $\tilde{Z}$. Ein Zustandsregler 132 und eine Additionsstelle 134 ermitteln die zu stellenden Antriebsdrehzahlen u in Abhängigkeit von dem Zustandsvektor $\tilde{Z}$ und den Sollgrößen S_{soll} . Es wird beispielsweise ein transponierter Verstärkungsvektor K' durch Polplatzierungs-Methode erzeugt:

$$K' = \begin{bmatrix} K(1) \\ K(2) \\ K(3) \end{bmatrix}$$

- Ein Zustandsvektor für die Laufkatze, wo x' der Ist-Geschwindigkeit der LK entspricht, ergibt sich zu

$$\tilde{Z} = [x' \quad \varphi_x \quad \varphi'_x] -$$

Die Stelldrehzahl u_{LK} ergibt sich dann beispielsweise zu:

$$\begin{aligned} u_{LK} &= x'_{\text{soll}} * K(1) - \tilde{Z} * K' = x'_{\text{soll}} * K(1) - (x' * K(1) + \varphi_x * K(2) + \varphi'_x * K(3)) = \\ &= x'_{\text{soll}} * K(1) - x' * K(1) - \varphi_x * K(2) - \varphi'_x * K(3) = (x'_{\text{soll}} - x') * K(1) - \varphi_x * K(2) - \varphi'_x * K(3) \\ &= -1 * [(x' - x'_{\text{soll}}) \quad \varphi_x \quad \varphi'_x] * K' \end{aligned}$$

In anderen Worten, werden im Zustandsvektor Ist-Soll-Differenzen gebildet, Φ_{soll} und $\Phi_{\text{dot_soll}}$ sind gleich null, und danach wird mit dem Verstärkungsvektor K' multipliziert, woraus sich die skalare Stelldrehzahl ergibt. Die Einheit der

- Figur 7 zeigt ein schematisch dargestelltes Beispiel eines Aufbaus der Laufkatze LK. Ein Fahrgestell 206 ist zum Verfahren der Laufkatze LK entlang einer Verfahrachse 207 des Katzauslegers vorgesehen. Beispielsweise umfasst das Fahrgestell 206 eine Mehrzahl von Rädern 212a-d, welche auf Schienen des Katzauslegers fahrbar gelagert sind. Wenigstens zwei zum Fahrgestell 206 feststehend angeordnete Umlenkrollen 202, 204 sind zum Umlenken des Hubseils in Richtung eines Lastaufnahmemittels UF eingerichtet.

- Die zum Fahrgestell 206 feststehend angeordnete Sensoreinrichtung 210 ist zur Ermittlung der Auslenkungswinkel φ_{1y} , φ_{ux} der zwischen der Laufkatze LK und einem Lastaufnahmemittel befindlichen Abschnitte HSL#1, HSL#2 des Hubseils zum durch die Laufkatze LK verlaufenden Lot eingerichtet. Ein von der Sensoreinrichtung 210 erzeugtes Sensorsignal repräsentiert einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung 210 oder Teilen davon und dem jeweiligen Abschnitt HSL#1, HSL#2 des Hubseils, der sich zwischen den Umlenkrollen 202, 204 der Laufkatze LK und der Umlenkrolle oder den Umlenkrollen des Lastaufnahmemittels befindet.

- Dem jeweiligen Abschnitt HSL#1, HSL#2 des Hubseils sind zwei oder mehr Sensoren 214#1, 216#1; 214#2, 216#2 zugeordnet, welche aus unterschiedlichen Winkeln auf den Abschnitt HSL#1, HSL#2 des Hubseils HSL gerichtet sind.

In einem nicht gezeigten Beispiel ist die Sensoreinrichtung 210 zumindest zu einem Teil zwischen den zwei Abschnitten HSL#1, HSL#2 des Hubseils angeordnet.

Auf der Laufkatze LK sind zur Erfassung des Seilwinkels φ_1 die Sensoren 214#1, 216#1, 214#2, 216#2 beispielsweise als Ultraschallsensoren, LiDAR-Sensoren oder andere Sensoren zur Messung des Abstands zwischen dem jeweiligen Sensors 214#1, 216#1, 214#2, 216#2 und dem zugeordneten Abschnitt HSL#1, HSL#2 angeordnet. Im gezeigten Beispiel sind die Sensoren 214#1, 216#1; 214#2, 216#2 auf die Abschnitte HSL#1, HSL#2 in die jeweilige Achsrichtung X oder Y paarweise jeweils lotrecht zueinander ausgerichtet. Gemessen wird also die Seilauslenkung gegenüber der Position des Sensors.

Da die Sensoren 214 und 216 gegeneinander auf derselben bzw. parallelen Achse ausgerichtet sind, lassen sich alle nicht parallele Seilauslenkungen herausrechnen. Die Auslenkungen der Seile gegeneinander werden somit messtechnisch kompensiert. Diese sind z.B. die beim Hebe- und Senkbetrieb auftretenden unterschiedlichen Ausbildungen einer trapezförmigen Anordnung der beiden Abschnitte HSL#1, HSL#2 zwischen der Laufkatze LK und dem Lastaufnahmemittel. Durch die ermittelbare Seillänge zwischen Laufkatze und Lastaufnahmemittel lässt sich dieser Effekt herausrechnen.

Figur 8 zeigt in schematischer Form die Berechnung des Abstands der Sensoren zu dem Abschnitt HSL#1 des Hubseils am Beispiel der beiden Sensoren 214#1, 216#1. Die dem jeweiligen Seilabschnitt HSL#1 zugeordneten Sensoren 214#1, 216#1 sind paarweise so zueinander ausgerichtet, dass eine sich ergebende Strecke C_1 in einem 45° Winkel zu dem Koordinatensystem des Krans steht.

Mit den Messwerten U_1 und U_2 , die einen jeweiligen Abstand des Seilabschnitts HSL#1 zu dem jeweiligen Sensor 214#1, 216#1 repräsentieren, lassen sich folgende Gleichungen ableiten:

$$(1) \quad U_1^2 = X_{10}^2 + Y_{10}^2$$

$$(2) \quad U_2^2 = Y_{10}^2 + (C_1 - X_{10})^2$$

Die Gleichungen (1) und (2) nach Y_{10}^2 und X_{10}^2 aufgelöst ergeben:

$$(3) \quad X_{10}^2 = U_1^2 - Y_{10}^2$$

$$(4) \quad Y_{10}^2 = U_2^2 - (C_1 - X_{10})^2$$

Durch Einsetzen von Gleichung (4) in die Gleichung (3) ergibt sich X_{10} wie folgt:

$$X_{10}^2 = U_1^2 - (U_2^2 - (C_1 - X_{10})^2)$$

$$X_{10}^2 = U_1^2 - U_2^2 + (C_1 - X_{10})(C_1 + X_{10})$$

$$X_{10}^2 = U_1^2 - U_2^2 + (C_1^2 - 2 \cdot C_1 \cdot X_{10} + X_{10}^2)$$

$$X_{10}^2 = U_1^2 - U_2^2 + C_1^2 - 2 \cdot C_1 \cdot X_{10} + X_{10}^2$$

$$0 = U_1^2 - U_2^2 + C_1^2 - 2 \cdot C_1 \cdot X_{10}$$

$$-U_1^2 + U_2^2 - C_1^2 = -2 \cdot C_1 \cdot X_{10}$$

$$(5) \quad X_{10} = \frac{U_1^2 - U_2^2 + C_1^2}{2 \cdot C_1}$$

Nun wird die Gleichung (5) in die Gleichung (4) eingesetzt. Somit ergibt sich Y_{10} zu:

$$(6) \quad Y_{10} = \sqrt{U_2^2 - \left(C_1 - \frac{U_1^2 - U_2^2 + C_1^2}{2 \cdot C_1}\right)^2}$$

Nun lassen sich ΔX_1 und ΔY_1 über Winkelfunktionen und dem Ergebnis aus Gleichung (6) errechnen:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{|Y_{10}|}{U_1}\right) - 45^\circ$$

$$5 \quad \frac{\Delta X_1}{U_1} = \sin(\alpha)$$

$$(7) \quad \Delta X_1 = U_1 \cdot \sin\left(\arcsin\left(\frac{|Y_{10}|}{U_1}\right) - 45^\circ\right)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{|Y_{10}|}{U_2}\right) - 45^\circ$$

$$\frac{\Delta Y_1}{U_2} = \sin(\alpha)$$

$$(8) \quad \Delta Y_1 = U_2 \cdot \sin\left(\arcsin\left(\frac{|Y_{10}|}{U_2}\right) - 45^\circ\right)$$

- 1 0 Analog zu den Gleichungen (7) und (8) werden ΔX_2 und ΔY_2 für die gegenüberliegende Seite, d.h. das andere Sensorpaar ermittelt.

- Figur 9 illustriert, wie durch die Bewegung des Lastaufnahmemittels in h-Richtung eine zusätzliche Auslenkung ΔX_1 bzw. ΔX_2 des Hubseils HSL in x-Richtung entsteht, und zwar abhängig von der Position der des Lastaufnahmemittels gegenüber den Umlenkrollen 202, 204 der Laufkatze LK. Diese Bewegung wird zwar messtechnisch herausgerechnet, es kann aber je nach Konfiguration sein, dass das Seil ab einer gewissen Nähe des Lastaufnahmemittels zu den Umlenkrollen 202, 204 durch diese Bewegung aus dem Erfassungsbereich der Sensoren herausläuft. Insbesondere bei Verwendung des Lastaufnahmemittels mit nur einer Umlenkrolle 302 verändert sich der Seilwinkel sehr stark. Dadurch würde das Hubseil HSL aus dem Messbereich der Sensoren 214#1 und 214#2, die in Figur 7 dargestellt sind, herauswandern. Zur Erweiterung des Abtastbereichs in x-Richtung, um die Auslenkung des Seils durch das Heben und Senken des Lastaufnahmemittels zu kompensieren, können sie Sensoren 214, 216 auf Figur 7 paarweise V-förmig angeordnet werden.

- Figur 10 zeigt die vorgenannte V-förmige Anordnung der Sensoren 214#1 und 216#1 bzw. 214#2 und 216#2 der Sensorvorrichtung der Laufkatze LK. Die übrigen Merkmale der Laufkatze LK sind den Figuren 1 und 7 zu entnehmen. Durch die V-förmige Anordnung ergibt sich ein größerer Messbereich 218#1, 218#2 in x-Richtung, während der Messbereich in y-Richtung sich nicht maßgeblich verändert.

- 2 5 Im gezeigten Beispiel befinden sich die Abschnitte HSL#1 und HSL#2 des Hubseils zwischen den Sensoren 214, 216. In einem nicht gezeigten alternativen Beispiel befinden sich die Sensoren 214, 216 zumindest teilweise, insbesondere ganz, zwischen den Abschnitten HSL#1 und HSL#2 des Hubseils.

Figur 11 illustriert die Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der Position des jeweiligen Abschnitts HSL#1 bzw. HSL#2 des Hubseils HSL am Beispiel der Anordnung der Figur 10.

Die Berechnung der Winkel erfolgt gemäß den Gleichungen (9) und (10):

$$(9) \quad U_1^2 = X_{10}^2 + Y_{10}^2$$

$$5 \quad (10) \quad U_2^2 = X_{10}^2 + (C_1 - Y_{10})^2$$

Die Gleichungen (9) und (10) nach Y_{10}^2 und X_{10}^2 aufgelöst ergeben sich zu:

$$(11) \quad Y_{10}^2 = U_1^2 - X_{10}^2$$

$$(12) \quad X_{10}^2 = U_2^2 - (C_1 - Y_{10})^2$$

Durch Einsetzen von Gleichung (11) in Gleichung (12) ergibt sich Y_{10} zu:

$$10 \quad Y_{10}^2 = U_1^2 - (U_2^2 - (C_1 - Y_{10})^2)$$

$$Y_{10}^2 = U_1^2 - U_2^2 + (C_1 - Y_{10})^2$$

$$Y_{10}^2 = U_1^2 - U_2^2 + C_1^2 - 2 \cdot C_1 \cdot Y_{10} + Y_{10}^2$$

$$0 = U_1^2 - U_2^2 + C_1^2 - 2 \cdot C_1 \cdot Y_{10}$$

Nach Y_{10} aufgelöst ergibt sich:

$$15 \quad (13) \quad Y_{10} = \frac{U_1^2 - U_2^2 + C_1^2}{2 \cdot C_1}$$

Die berechnete Größe Y_{10} wird in Gleichung (12) eingesetzt, um X_{10} zu berechnen:

$$X_{10} = \sqrt{U_2^2 - (C_1 - Y_{10})^2}$$

$$(14) \quad \Delta Y_1 = \frac{C_1}{2} - Y_{10}$$

Um ΔX_1 berechnen zu können, wird die Höhe H des zugeordneten gleichschenkligen Dreiecks berechnet werden.

$$20 \quad (15) \quad H^2 = a^2 + \left(\frac{C_1}{2}\right)^2$$

$$(16) \quad H = \sqrt{a^2 + \left(\frac{C_1}{2}\right)^2}$$

Für ΔX_1 ergibt sich damit:

$$(17) \quad \Delta X_1 = X_{10} - H = X_{10} - \sqrt{a^2 + \left(\frac{C_1}{2}\right)^2}$$

Analog zu den Gleichungen (14) und (17) werden ΔX_2 und ΔY_2 für den gegenüberliegenden Abschnitt des Hubseils berechnet.

25

Figur 12 illustriert, dass durch das Abrollverhalten des Hubseils über die Umlenkrollen 202, 204 unterschiedliche Längen L_1 und L_2 der Abschnitte HSL#1, HSL#2 des Hubseils bis zu einer Sensorachse 222 entstehen. Dies wird durch die Gleichung (18) ausgeglichen. Die mittlere Seillänge L bleibt somit konstant.

$$(18) L = \frac{L_1 + L_2}{2}$$

- 5 Die mittels der Gleichungen (7) und (8) bzw. (14) und (17) ermittelte Abstände ΔX_1 und ΔY_1 bzw. ΔX_2 und ΔY_2 werden nun über die bekannte und konstante Seillänge aus (18) bis zu der Umlenkrolle 202, 204 in Winkel umgerechnet.

- 1 0 Der nicht kompensierte Winkel φ_{ux} gemäß Gleichung (19) beschreibt die Auslenkung der Last gegenüber der Laufkatze in x-Richtung. Bedingt durch die Neigung der Laufkatze LK entsteht eine Abweichung zu dem absoluten Winkel der Abschnitte HSL#1, HSL#2 des Hubseils gegenüber dem Lot durch die Laufkatze LK. Der deshalb unkompenzierte Winkel φ_{ux} wird deshalb kompensiert.

$$(19) \varphi_{ux} = \frac{\arctan\left(\frac{\Delta X_1}{L}\right) + \arctan\left(\frac{\Delta X_2}{L}\right)}{2}$$

Analog dazu wird der Winkel φ_{1y} gemäß Gleichung (20) ermittelt. Dieser beschreibt analog zu dem Winkel φ_{ux} die Auslenkung der Last in y-Richtung. Eine Kompensation ist hier allerdings nicht notwendig.

1 5
$$(20) \varphi_{1y} = \frac{\arctan\left(\frac{\Delta Y_1}{L}\right) + \arctan\left(\frac{\Delta Y_2}{L}\right)}{2}$$

- 2 0 Figur 13 illustriert die Kompensation des Winkels φ_{ux} , wozu der Neigungswinkel der Laufkatze herangezogen wird. Der durch das Verbiegen des Katzauslegers KA bei Lastbewegungen entstehende Neigungswinkel $\Delta\varphi$ wird an der Laufkatze LK sensorisch ermittelt. Dieser Neigungswinkel $\Delta\varphi$ erfasst den absoluten Winkel der Laufkatze LK zum Horizont in der gedachten hx-Ebene, die von Turm T und Katzausleger KA aufgespannt wird. Zwischen einem Lot L_{LK} durch die Mitte der Laufkatze und einer Achse A_{LK} die lotrecht zur aktuellen Verfahrachse der Laufkatze LK steht, ergibt sich der Neigungswinkel $\Delta\varphi$.

Mit dem ermittelten Neigungswinkel $\Delta\varphi$ kann nun der Winkel φ_{ux} zu φ_{1x} kompensiert werden:

$$(21) \varphi_{1x} = \varphi_{ux} - \Delta\varphi$$

Somit sind die beiden Auslenkungswinkel bzw. Seilwinkel φ_{1x} und φ_{1y} mittels der Gleichungen (20) und (21) erfasst.

- 2 5 Die von den unterschiedlichen Sensorvorrichtungen 210 und 310 aus Figur 1 stammenden gemessenen Auslenkungswinkel werden mit den Faktoren $k_x : (0 \leq k_x \leq 1)$ und $k_y : (0 \leq k_y \leq 1)$ gewichtet. Dabei gewichten die vorgenannten Faktoren den Einfluss des jeweiligen Winkels auf das Ergebnis der Sensorfusion. Der jeweilige Faktor wird in Abhängigkeit von der Pendellänge l angepasst, um ungewollte Schwingungen der Sensordaten in Extrembereichen zu minimieren. Die Sensordaten der Sensorvorrichtung an der Laufkatze werden bei großen Seillängen ($>50m$) durch die Eigenschwingung der Seilabschnitte des Hubseils überlagert. Die Sensordaten der Sensorvorrichtung an dem Lastaufnahmemittel werden hingegen bei kleinen Seillängen ($<10m$) durch das ausgeprägte Aufschaukeln der Unterflasche - besonders bei leerem

Hacken - durch die Eigenschwingung überlagert. Entsprechend werden die Pendelwinkel, die einem virtuellen Seilwinkel bis zur virtuellen Last entsprechen (siehe Figuren 2 und 3, gemäß den Gleichungen (22) und (23) ermittelt:

$$(22) \varphi_x = k_x \varphi_{1x} + (1 - k_x) \varphi_{2x}$$

$$(23) \varphi_y = k_y \varphi_{1y} + (1 - k_y) \varphi_{2y}$$

- 5 Die Pendellänge l ergibt sich mit der festlegbaren Länge l_K zu:

$$(24) l = l_1 + l_K$$

Durch die in den Gleichungen (22) und (23) durchgeführte Fusion der einzelnen Sensordaten werden unerwünschten phasenverschobene Schwingungen reduziert bzw. eliminiert.

- 1 0 Die durch das Lastaufnahmemittel verursachten Schwingungen werden auf der Laufkatze und dem Lastaufnahmemittel jeweils phasenverschoben erfasst und durch die Addition in den Gleichungen (22) (23) vorteilhaft eliminiert. Dieses ist deshalb wichtig, da es häufig vorkommt, dass die beiden Endpunkte des Doppelpendels (in diesem Fall die Laufkatze und die Last) sich nicht bewegen und nur der mittlere Teil des Doppelschwingers (in diesem Fall die Unterflasche bzw. das Lastaufnahmemittel) noch pendelt.

- 1 5 Die so nun erfassten Pendelwinkel φ_x und φ_y gehen in die beschriebene Regelung als Regelgrößen ein. Die virtuelle Länge bzw. Pendellänge l wird dem Model des Krans als Parameter zugefügt. In anderen Worten wird die durch die vorgenannten Parameter ermittelte Lastposition als Regelparameter in das Regelungssystem eingebracht.

Durch die Erfassung der Auslenkung des Abschnitts KSL#1 des Katzfahrseils, das mit der Laufkatze verbunden ist, gegenüber der Längsachse A_KA des Katzauslegers KA wird der Drehwinkel θ der Laufkatze LK um die Hochachse H des Turms T in der xy-Ebene ermittelt.

- 2 0 In Figur 14 ist gezeigt, wie durch die elastische Bewegung des Katzauslegers KA sich eine Differenz zwischen dem Drehwinkel θ der Laufkatze LK und somit der Last zur Längsachse A_KA des Katzauslegers KA gegenüber dem Drehwinkel θ_u des Turms T zum Katzausleger KA.

- 2 5 Die Sensorvorrichtung 410 zur Ermittlung einer Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ umfasst gemäß Figur 14 die zwei Sensoren 412a und 412b, die feststehend zum Katzausleger in der gedachten Ebene xy angeordnet sind, und zwischen denen sich der Abschnitt KSL#1 des Katzseils befindet. Die Sensoren 412a und 412b ermitteln den jeweiligen Abstand zum Abschnitt KSL#1 des Katzseils. Durch den bekannten Abstand zwischen der Sensorvorrichtung 410 und der Hochachse des Turms lässt sich die Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ ermitteln. Die Sensoren 412a und 412b sind beispielsweise als Ultraschallsensoren, LiDAR-Sensoren oder andere Sensoren zur Messung des Abstands zwischen den Sensoren 412a, 412b und dem Abschnitt KSL#1 des Katzseils ausgebildet.

- 3 0 Alternativ ist denkbar die Drehwinkeldifferenz $\Delta\theta$ mit Hilfe von zusätzlichen Sensoren wie z.B. einem elektronischen Kompass, GPS oder anderen geometrischen Messverfahren etc. zu erfassen.

Folglich ergibt sich der Drehwinkel θ der Laufkatze LK und somit der Last zur Längsachse A_KA des Katzauslegers KA:

$$(25) \theta = \theta_u + \Delta\theta$$

Zu dem zuvor in Figur 4a gezeigten Regelsystem wird im Folgenden allgemein auf eine Zustandsraum-Darstellung eingegangen. Bei der Zustandsraum-Darstellung werden lineare Systeme n-ter Ordnung in n Teilsysteme erster Ordnung zerlegt, um die mathematische Beschreibung und den Entwurf des Zustandsreglers übersichtlich zu gestalten. Bei dem Katzfahnwerk handelt es sich beispielsweise um ein Mehrgrößensystem mit vier Zustandsgrößen, da es ebenso viele wesentliche Speicherfunktionen hat. Je zwei dieser Zustandsgrößen beziehen sich auf die Laufkatze und auf das Mehrfachpendel, welches Hubseil, Lastaufnahmemittel, Anschlagmittel und Last umfasst. Beide Systeme für sich betrachtet, stellen eine zweifach integrierende Strecke dar. Sie sind miteinander gekoppelt, da eine Bewegung der Laufkatze auch immer eine Bewegung des Mehrfachpendels nach sich zieht. Die Rückwirkung der Bewegungen des Mehrfachpendels wird hier vernachlässigt werden, da der Frequenzumrichter die Geschwindigkeit der Laufkatze regelt und damit die Rückwirkung auf die Laufkatze verhindert.

Der Reglerentwurf baut auf einer mathematischen Beschreibung auf, die durch die Systemanalyse von dem Mehrgrößensystem gewonnen wird. Die Differentialgleichungen werden in Matrix- und Vektorform gebracht und können durch Matrixoperationen umgewandelt werden. Man erhält die Eigenwerte des Systems, an denen in diesem Fall die Instabilität des Systems erkennbar ist. Bei der Methode der Polvorgabe wird - basierend auf neuen, gewählten Eigenwerten - ein Wunschsysteem geschaffen, welches ein stabiles Verhalten und gewünschte Dynamik besitzt. Die Differenz zwischen dem realen, instabilen System und dem Wunschsysteem wird dann von dem Zustandsregler mit Hilfe der errechneten Reglerkoeffizienten aufgebracht.

Die Aufgabe des Zustandsreglers besteht darin, aus den Zustandsgrößen und dem Sollwert die Stellgröße zu errechnen. Dabei werden die Zustandsgrößen mit konstanten Reglerfaktoren und der Sollwert mit dem Vorfilterwert multipliziert. Die Summe dieser Produkte ist dann die gesuchte Stellgröße. Man könnte vereinfacht von vier überlagerten P-Reglern sprechen. Daran ist sofort zu erkennen, dass der Zustandsregler keine I- oder D-Anteile besitzt. Letztere sind nur insofern vorhanden, als dass eine Zustandsgröße das Differential einer anderen Zustandsgröße sein kann. Somit fließen dann wiederum D-Anteile in die Regelung mit ein.

Figur 15 zeigt einen Signalfussplan, der sich auf die Laufkatze bezieht und sich aus der nachfolgenden Gleichung (29) ergibt. Eine Geschwindigkeit u_{LK} der Laufkatze entspricht einer Größe am Reglerausgang und reagiert auf eine sprungförmige Stellgrößenänderung mit einem PT1-Verhalten. Zuerst wird das linearisierte Prozessmodell vierter Ordnung beschrieben. Die vier Zustandsgrößen werden folgendermaßen festgelegt:

x	LK-Position
$x' = v$	LK-Geschwindigkeit
φ_x	Pendelwinkel
φ_x'	Pendelwinkelgeschwindigkeit: φ_x' kann entweder mit einem Beobachter oder durch numerische Ableitung gewonnen werden:

$$\varphi_{x_k}' = \frac{(\varphi_{x_k} - \varphi_{x_{k-1}})}{T_a}$$

T_a Abtastzeit.

Zur Nachbildung des Prozesses und der Auslegung des Zustandsreglers werden folgende Prozesswerte benötigt:

T_{Stell} Zeitkonstante des PT1-Gliedes, das den Stellglied (Frequenzumrichter + Getriebemotor + Masseträgheiten);

l Pendellänge als Abstand bis zum Lastschwerpunkt S .

5

Wie schon erwähnt, lässt sich die Übergangsfunktion der Drehzahl mit der eines PT1-Gliedes annähern. Somit ist die Übergangsfunktion der Geschwindigkeit der Laufkatze:

$$(26) \quad x' = u_{LK} \cdot K \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

10 K und T Parameter des PT1-Gliedes und werden nachfolgend bestimmt. Die Ableitung von Gleichung (26) ergibt die LK-Beschleunigung:

$$(27) \quad x'' = u_{LK} \cdot \frac{K}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

Die Gleichung (27) wird nach $e^{-\frac{t}{T}}$ aufgelöst und in (26) einsetzen, woraus sich ergibt:

$$(28) \quad T \cdot x'' + x' = K \cdot u_{LK}$$

$$(29) \quad x'' = \frac{K}{T} \cdot u_{LK} - \frac{1}{T} \cdot x'$$

15 Anhand der Figur 16 wird der Bewegungsablauf des Pendelsystems untersucht. Auf das hängende Mehrfachpendel (siehe Figuren 2 und 3 der vorangehenden Beschreibung) wirken zwei Kräfte: Die nach unten gerichtete Gewichtskraft F_g und die Seilkraft F_s . Letztere überträgt die Bewegungen der Laufkatze LK auf die Last mit der Masse m beim virtuellen Schwerpunkt des Mehrfachpendels. Damit ergeben sich Bilanzen der Horizontal- und Vertikalkräfte, deren Summen nach dem Newtonschen Kräftegleichgewicht jeweils den Wert Null ergeben. Neue Hilfsvariable sind:

20 x_{Last} horizontale Position des virtuellen Schwerpunkts der Last bzw. des Mehrfachpendels; und

h_{Last} vertikale Position des virtuellen Schwerpunktes der Last bzw. des Mehrfachpendels

Die Horizontalkräfte und Vertikalkräfte ergeben sich gemäß Gleichungen (30) und (31):

$$(30) \quad m \cdot x_{Last}'' + F_s \cdot \sin(\varphi_x) = 0$$

$$(31) \quad -m \cdot g + m \cdot h_{Last}'' + F_s \cdot \cos(\varphi_x) = 0$$

25 Für die Zustandsgleichungen, in denen nur x, x', φ_x und φ_x' enthalten sind, müssen alle anderen Variablen (F_s, x_{Last} und h_{Last}) eliminiert werden. Erweitert man Gleichung (30) mit $\cos(\varphi_x)$ und (31) mit $\sin(\varphi_x)$, so erhält man:

$$(32) \quad m \cdot x_{Last}'' \cdot \cos(\varphi_x) + F_s \cdot \sin(\varphi_x) \cdot \cos(\varphi_x) = 0$$

$$(33) \quad -m \cdot g \cdot \sin(\varphi_x) + m \cdot h_{Last}'' \cdot \sin(\varphi_x) + F_s \cdot \cos(\varphi_x) \cdot \sin(\varphi_x) = 0$$

Zieht man (32) von (33) ab, wird die Stabkraft F_s entfernt. Anschließend wird das Ergebnis durch die Lastmasse m dividiert und diese so ebenfalls entfernt:

$$(34) \quad x_{Last}'' \cdot \cos(\varphi_x) - h_{Last}'' \cdot \sin(\varphi_x) = -g \cdot \sin(\varphi_x)$$

Die Koordinaten der Last (x_{Last} und h_{Last}) werden mit Hilfe der Transformationsgleichungen eliminiert:

$$5 \quad (35) \quad x_{Last} = x + l \cdot \sin(\varphi_x)$$

$$(36) \quad h_{Last} = l \cdot \cos(\varphi_x)$$

Da die Variablen x_{Last} und h_{Last} in ihrer zweiten Ableitung in (34) auftreten, müssen Sie zweimal abgeleitet werden:

$$(37) \quad x_{Last}' = x' + l \cdot \varphi_x' \cdot \cos(\varphi_x)$$

$$10 \quad h_{Last}' = -l \cdot \varphi_x' \cdot \sin(\varphi_x)$$

$$(38) \quad x_{Last}'' = x'' + l \cdot \varphi_x'' \cdot \cos(\varphi_x) - l \cdot \varphi_x'^2 \cdot \sin(\varphi_x)$$

$$h_{Last}'' = -l \cdot \varphi_x'' \cdot \sin(\varphi_x) - l \cdot \varphi_x'^2 \cdot \cos(\varphi_x)$$

Die Gleichungen für x_{Last}'' und h_{Last}'' (38) werden in (39) eingesetzt. So erhält man die nichtlineare Differentialgleichung des Pendelsystems:

$$15 \quad (39) \quad x'' \cdot \cos(\varphi_x) + l \cdot \varphi_x'' = -g \cdot \sin(\varphi_x)$$

Um diese Differentialgleichung zu linearisieren, wird der Pendelwinkel φ_x als sehr klein angenommen:

$$\varphi_x \ll 1 \Rightarrow \sin(\varphi_x) \approx \varphi_x \quad \text{und} \quad \cos(\varphi_x) \approx 1 \quad \text{und} \quad \varphi_x'^2 \approx 0$$

$$(40) \quad x'' + l \cdot \varphi_x'' = -g \cdot \varphi_x$$

Die linearisierte Differentialgleichung (40) wird nach φ_x'' aufgelöst (41) und ist als Signalfussplan in Figur 17 dargestellt.

$$20 \quad (41) \quad \varphi_x'' = -\frac{g}{l} \cdot \varphi_x - \frac{1}{l} \cdot x''$$

Für x'' in der Zeitgleichung für das Pendelsystem gemäß Gleichung (41) kann die Zeitgleichung (29) für die Laufkatze eingesetzt werden. Dieses ermöglicht die Verknüpfung der voran gezeigten Signalfusspläne. Die Gleichung (29) eingesetzt in (41) ergibt:

$$(42) \quad \varphi_x'' = -\frac{g}{l} \cdot \varphi_x - \frac{K}{T \cdot l} \cdot x_{LK} + \frac{1}{T \cdot l} \cdot x'$$

25 Um das System im Zustandsraum zu beschreiben, werden die linearen Differentialgleichungen in Zustandsgleichungen umgewandelt. Hierfür werden die Variablen x , x' , φ_x und φ_x' durch die Zustandsgrößen $q = [q_0, q_1, q_2, q_3]$ ersetzt:

$$(43) \quad x'' = \frac{K}{T} \cdot u_{LK} - \frac{1}{T} \cdot x'$$

$$(44) \quad \varphi_x'' = -\frac{g}{l} \cdot \varphi_x - \frac{K}{T \cdot l} \cdot u_{LK} + \frac{1}{T \cdot l} \cdot x'$$

Für die übersichtlichere Kurzform werden Vektoren und Matrizen eingeführt. Man erhält die Vektor-Differentialgleichung für Zustandsgrößen:

$$(45) \begin{bmatrix} \dot{x}' \\ \dot{x}'' \\ \dot{\varphi}_x' \\ \dot{\varphi}_x'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{l \cdot T} & -\frac{g}{l} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ x'' \\ \varphi_x' \\ \varphi_x'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T} \\ 0 \\ -\frac{K}{l \cdot T} \end{bmatrix} \cdot u_{LK}$$

Der Regler bekommt als Sollwert die gewünschte Geschwindigkeit der Laufkatze im Bereich von -100 bis 100% von

- 5 Nenngeschwindigkeit mit Genauigkeit von $\Delta V = \frac{100\%}{20000} = 0.005\% = 8.3 \frac{mm}{s}$ und regelt unverstärkt die Geschwindigkeit der Laufkatze, daraus folgt $K = K_{stg} = 1$. Die Ist-Drehzahl folgt dem Sollwert mit einer Verzugszeit von $T = T_{stg} = 0.2 s$.

Um ein Pendelfreies Positionieren zu ermöglichen, wird ein Zustandsregler eingesetzt, der das ungedämpfte Realsystem in ein ausreichend gedämpftes Wunschsystem umwandelt. Dafür werden zunächst Zahlen in die Eingangs- und Systemmatrix

- 10 eingesetzt: $T = T_{stg} = 0.2 s$; $K = K_{stg} = 1$; l : variabel.

$$(46) A_{LK} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{5}{l} & -\frac{9.81}{l} & 0 \end{bmatrix} B_{LK} = \begin{bmatrix} 0 \\ 5 \\ 0 \\ -\frac{5}{l} \end{bmatrix}$$

Bei der Assistenzregelung ist die Geschwindigkeit der LK die Regelgröße. Der Regler sorgt also dafür, dass die LK die Geschwindigkeitsvorgabe möglichst pendelfrei folgt. In diesem Fall ist die Position der Laufkatze uninteressant, auf diese Zustandsgröße kann sich die Zustandsraumdarstellung reduziert werden. Die neue Matrixdarstellung lautet:

$$15 (47) A_{LK} = \begin{bmatrix} -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{5}{l} & -\frac{9.81}{l} & 0 \end{bmatrix} B_{LK} = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \\ -\frac{5}{l} \end{bmatrix}$$

Um einen Regler auslegen zu können, wird eine Seillänge gemäß der Pendellänge l angenommen: z.B. für $l = 5 m$ ergibt sich folgende Matrixdarstellung:

$$(48) A_{LK} = \begin{bmatrix} -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1.962 & 0 \end{bmatrix} B_{LK} = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

Die systembeschreibenden Eigenwerte bekommt man durch Ermittlung der Nullstellen des Charakteristisches Polynoms:

$$20 (49) \det(\lambda \cdot I - A) = 0$$

Alternativ nutzt man ein Simulationswerkzeug:

$$(50) eig(A) = [1.4007i \quad -1.4007i \quad -2.5]$$

An der ersten und zweiten Imaginärlösung lässt sich erkennen, dass es sich bei dem Realsystem um ein ungedämpftes Schwingssystem handelt, da Realteil erste 2 Polen 0 ist.

Für die digitale Regelung ist eine diskrete Darstellung erforderlich, was beispielsweise in Matlab mit folgendem Befehl zu bekommen ist:

$$(51) [Ad, Bd, Cd, Dd] = c2d(A, B, C, D, T_a);$$

Für $T_a = 0.1s$:

$$5 \quad (52) Ad = \begin{bmatrix} 0.7788 & 0 & 0 \\ 0.0023 & 0.9902 & 0.0997 \\ 0.0441 & -0.1956 & 0.9902 \end{bmatrix} \quad Bd = \begin{bmatrix} 0.2212 \\ -0.0023 \\ -0.0441 \end{bmatrix}$$

Die Eigenwerte für diskrete Darstellung ergeben sich zu:

$$(53) EWd = eig(Ad) = \begin{bmatrix} 0.9902 + 0.1396i \\ 0.9902 - 0.1396i \\ 0.7788 \end{bmatrix}$$

$$(54) abs(EWd) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0.7788 \end{bmatrix}$$

- 1 0 Erste und zweite komplexe Pole liegen auf dem Einheitskreis, was auch auf Schwingssystem deutet. Um zu dem pendelfreien Wunschsystem zu gelangen, wird letzteres durch die Vorgabe seiner Eigenwerte definiert. Es werden also die Pole des Systems vorgegeben (Polvorgabe). Die Pole werden dabei so platziert, dass das zur Verfügung stehende Beschleunigungsmoment nicht überschritten wird. Je näher die Pole zu der Mitte des Einheitskreises gewählt werden, desto dynamischer wird das Wunschsystem und desto größer wird der maximale Auslenkungswinkel während der Beschleunigungsphase, was sich negativ auf den Stahlbau auswirkt. Es wird also ein Optimum im Sinne eines Kompromisses ermittelt, wobei beide Aspekte berücksichtigt werden. Sollte sich die Seillänge bzw. Pendellänge l ändern, werden auch Eigenwerte und der daraus resultierende Regler neu berechnet bzw. aktualisiert.
- 1 5

Alternativ zu Polvorgabe kann auch Riccati-Regler (LQ-Regler) angewendet werden. Das ist ein Zustandsregler für ein lineares dynamisches System, dessen Rückführmatrix über die Minimierung einer quadratischen Kostenfunktion ermittelt wird. Das ermöglicht eine optimale Reglerauslegung bei vorgegebenen Zustandsgewichtungen Q .

- 2 0 Anhand der Figuren 18 und 19 wird eine Systemanalyse des Drehwerks durchgeführt. Die vier Zustandsgrößen des Drehwerks werden folgendermaßen definiert:

- | | |
|------------------|---|
| θ | DW-Winkel |
| θ' | DW-Winkelgeschwindigkeit |
| φ_y | Pendelwinkel |
| 2 5 φ_y' | Pendelwinkelgeschwindigkeit, welche entweder durch Beobachtung oder durch numerische Ableitung gewonnen wird. |

Die Drehbewegung des Katzauslegers KA lässt sich mit folgender Gleichung beschreiben:

$$(55) I_A \cdot \theta'' = M - M_R,$$

wobei folgende Größen verwendet werden:

I_A auf Drehwerk wirkendes Trägheitsmoment;

M Antriebsmoment des Drehwerks;

M_R Gegenmoment;

$$M_R = F_R \cdot x$$

$$5 \quad (56) \quad M_R = m \cdot y_L'' \cdot x$$

$$F_R = \sin(\varphi_y) \cdot m \cdot g$$

$$I_A \cdot \theta'' = M - \sin(\varphi_y) \cdot m \cdot g \cdot x$$

Die Bewegungsgleichungen für die Last ergeben sich zu:

$$(57) \quad m \cdot y_L'' = y - m \cdot g$$

$$10 \quad m \cdot z_L'' = F_R$$

Die Bewegungsgleichung für die Last in Y-Richtung ergeben sich zu :

$$y_L = y + l \cdot \sin(\varphi_y)$$

$$y_L' = y' + l \cdot \cos(\varphi_y) \cdot \varphi_y'$$

$$(58) \quad y_L'' = y'' - l \cdot \sin(\varphi_y) \cdot \varphi_y'^2 + l \cdot \cos(\varphi_y) \cdot \varphi_y''$$

15 Die Bewegungsgleichungen für die Last in Z-Richtung ergeben sich zu:

$$z_L = l - l \cdot \cos(\varphi_y)$$

$$z_L' = l \cdot \sin(\varphi_y) \cdot \varphi_y'$$

$$(59) \quad z_L'' = l \cdot \cos(\varphi_y) \cdot \varphi_y'^2 + l \cdot \sin(\varphi_y) \cdot \varphi_y''$$

Die Gleichungen (55) und (56) ergeben zusammen

$$20 \quad (60) \quad I_A \cdot \theta'' = M - m \cdot x \cdot y_L''$$

Gleichung (58) in (60) einsetzen ergibt:

$$I_A \cdot \theta'' = M - m \cdot x \cdot (y'' - l \cdot \sin(\varphi_y) \cdot \varphi_y'^2 + l \cdot \cos(\varphi_y) \cdot \varphi_y'')$$

$$(61) \quad \frac{I_A}{m \cdot x} \cdot \theta'' = \frac{M}{m \cdot x} - y'' + l \cdot \sin(\varphi_y) \cdot \varphi_y'^2 - l \cdot \cos(\varphi_y) \cdot \varphi_y''$$

Um die 1. Differentialgleichung zu erhalten, werden die Umrechnungen von y'' zu θ'' durchgeführt:

$$25 \quad y \approx x \cdot \theta$$

$$y' \approx x \cdot \theta'$$

$$y'' \approx x \cdot \theta''$$

Mit dem Drehwinkel θ in Bogenmaß in y'' einsetzen ergibt:

$$\frac{I_A}{m \cdot x} \cdot \theta'' = \frac{M}{m \cdot x} - x \cdot \theta'' + l \cdot \sin(\varphi_y) \cdot \varphi_y'^2 - l \cdot \cos(\varphi_y) \cdot \varphi_y''$$

$$\frac{I_A}{m \cdot x} \cdot \theta'' + x \cdot \theta'' = \frac{M}{m \cdot x} + l \cdot \sin(\varphi_y) \cdot \varphi_y'^2 - l \cdot \cos(\varphi_y) \cdot \varphi_y''$$

$$(62) \left(\frac{I_A}{m \cdot x} + x \right) \cdot \theta'' = \frac{M}{m \cdot x} + l \cdot \sin(\varphi_y) \cdot \varphi_y'^2 - l \cdot \cos(\varphi_y) \cdot \varphi_y'' \quad 1. \text{ DGL}$$

- 5 Die Differentialgleichung (64) ist identisch der Differentialgleichung (39) aus der Modellierung der Laufkatze:

$$x'' \cdot \cos(\varphi_x) + l \cdot \varphi_x'' = -g \cdot \sin(\varphi_x) \quad 2. \text{ DGL der LK}$$

$$(63) l \cdot \varphi_x'' = -x'' \cdot \cos(\varphi_x) - g \cdot \sin(\varphi_x)$$

An das Drehwerk angepasst ergibt sich:

$$\varphi_x \rightarrow \varphi_y$$

10

$$x'' \rightarrow y'' = x \cdot \theta''$$

Ergibt die 2.DGL:

$$(64) l \cdot \varphi_y'' = -x \cdot \theta'' \cdot \cos(\varphi_y) - g \cdot \sin(\varphi_y) \quad 2. \text{ DGL}$$

Um die Differentialgleichungen zu linearisieren, wird der Pendelwinkel φ_y als sehr klein angenommen:

$$(65) \varphi_x \ll 1 \Rightarrow \sin(\varphi_x) \approx \varphi_x \quad \text{und} \quad \cos(\varphi_x) \approx 1 \quad \text{und} \quad \varphi_x'^2 \approx 0$$

- 15 Die Steuergröße entspricht dem Antriebsmoment des Drehwerksantriebs:

$$(66) M = u_{DW}$$

$$(67) \theta'' = \frac{m \cdot x \cdot g}{I_A} \cdot \varphi_y + \frac{1}{I_A} \cdot u_{DW} \quad 1. \text{ DGL}$$

$$(68) \varphi_y'' = - \left(\frac{m \cdot x^2 \cdot g}{l \cdot I_A} + \frac{g}{l} \right) \cdot \varphi_y - \frac{x}{l \cdot I_A} \cdot u_{DW} \quad 2. \text{ DGL}$$

In Zustandsraumdarstellung ergibt sich:

20

$$(69) \begin{bmatrix} \theta' \\ \theta'' \\ \varphi_y' \\ \varphi_y'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m \cdot x \cdot g}{I_A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & - \left(\frac{m \cdot x^2 \cdot g}{l \cdot I_A} + \frac{g}{l} \right) & - \frac{g}{l} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta \\ \theta' \\ \varphi_y \\ \varphi_y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_A} \\ 0 \\ - \frac{x}{l \cdot I_A} \end{bmatrix} \cdot u_{DW}$$

$$(70) A_{DW} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m \cdot x \cdot g}{I_A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & - \left(\frac{m \cdot x^2 \cdot g}{l \cdot I_A} + \frac{g}{l} \right) & - \frac{g}{l} & 0 \end{bmatrix}$$

$$(71) B_{DW} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{l_A} \\ 0 \\ -\frac{x}{l \cdot l_A} \end{bmatrix}$$

Der Reglerentwurf für Drehwerk (Y-Richtung) und das Hubwerk läuft nach dem im Wesentlichen gleichen Prinzip ab. Es ergibt sich ein Kranmodell in Zustandsraum bestehend aus drei Zuständen für das Laufkatz-Modell, vier Zuständen für das Drehwerk-Modell und zwei Zuständen für das Hubwerk-Modell:

- 5 Zustände: $\vec{Z} = [x' \quad \varphi_x \quad \varphi_x' \quad \theta \quad \theta' \quad \varphi_y \quad \varphi_y' \quad l \quad l']$;

$$(72) \begin{bmatrix} x'' \\ \varphi_x' \\ \varphi_x'' \\ \theta' \\ \theta'' \\ \varphi_y' \\ \varphi_y'' \\ l' \\ l'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{LK} & & & & & & & & \\ & A_{DW} \rightarrow A_{LK} & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & A_{DW} & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{HW} & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ \varphi_x \\ \varphi_x' \\ \theta \\ \theta' \\ \varphi_y \\ \varphi_y' \\ l \\ l' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{LK} & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ 0 & & 0 \\ 0 & B_{DW} & 0 \\ 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{HW} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{LK} \\ u_{DW} \\ u_{HW} \end{bmatrix}$$

Der Regler benutzt beispielsweise die aktuelle Position der Last gegenüber den horizontalen Turmachsen oder die Geschwindigkeiten der Last als Regelgröße.

- 1 0 Die jeweiligen Sollgrößen $x'_{soll}, \theta_{soll}, l_{soll}$ bzw. S_{soll} werden aus den Joystickeingaben der Bedieneinheit aufintegriert. Dabei wird die Drehzahl u_{LK}, u_{DW}, u_{HW} des jeweiligen Antriebs (Katzfahrwerk, Drehwerk und Hubwerk) als Vorgabe benutzt, um sowohl die Sollgeschwindigkeit der Last oder die Sollposition der Last zu erreichen. Die Joystick-Vorgabe kann sowohl stufenbasiert als auch prozentual zur Maximalgeschwindigkeit erfolgen. Die nachfolgenden Gleichungen beziehen sich auf die Beispiele der Figuren 5 und 6.

1 5 (73) $\vec{S}_{soll} = [x'_{soll} \quad \theta_{soll} \quad l_{soll}]$

(74) $\vec{u} = [u_{LK} \quad u_{DW} \quad u_{HW}]$

(75) $\vec{Z} = [x \quad \varphi_x \quad \theta \quad \varphi_y \quad l \quad l']$;

(76) $\vec{\tilde{Z}} = [x' \quad \varphi_x \quad \widetilde{\varphi_x'} \quad \theta \quad \theta' \quad \varphi_y \quad \widetilde{\varphi_y'} \quad l \quad l']$;

- 2 0 In der Regelungsschleife werden anhand des Kranmodells (72) die jeweils zukünftigen Bewegungen der Messgrößen $x' \quad \varphi_x \quad \theta \quad \theta' \quad \varphi_y \quad l$ errechnet. Auf dieser Basis wird die Regelgröße für die nachfolgende Regelschleife ermittelt und dem Kran als Sollgröße vorgegeben.

- Im Gegensatz zu einem konventionellen Regelungssystem, dass nur eine Dämpfung der Schwingung ermöglicht, wird anhand der vorhandenen (fusionierten) Sensor- und Modelldaten eine optimale Trajektorie der Bewegung (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.
- 2 5

Eine nachträgliche Dämpfung des schwingenden Pendelsystems ist somit nicht erforderlich, bzw. ein darauf abgestellter Regelungsumfang ist sehr begrenzt und effektiv zu bewerkstelligen.

- 5 Nach der Aktivierung der Regelung durch Sollwertvorgabe geht der Regler in Beschleunigungsphase, während dessen werden nicht nur durch die Anfangsbewegung entstehende Pendelbewegung, sondern auch Anfangspendelbewegung eliminiert. Danach, solange der Sollwert (Stufe) konstant bleibt, folgt die Konstantfahrt-Phase, wo die Last mit konstanter Geschwindigkeit ohne Pendelbewegung bewegt wird. Jede Sollwert- bzw. Stufenänderung initiiert wiederum eine Beschleunigungs- oder Bremsphase.

- 1 0 Die Regelung wird auch nach Impulsartige Betätigung des Steuerpults aktiviert. In diesem Fall wird nur die Anfangspendelbewegung ausgeregelt. Die Zeit für die Ausregelung kann sinnvollerweise mit auf eine Pendelperiode begrenzt werden. Die Pendelperiode ist wie bekannt nur Längenabhängig und wird mit folgender Formel berechnet:

$$(77) T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

- 1 5 Figur 20 zeigt in schematischer Form die Steuerungseinheit 100. Diese besteht aus einer ersten Recheneinheit 150 und einer zweiten Recheneinheit 160. Die erste Recheneinheit 150 ist mit den Antrieben des Krans verbunden und stellt Sicherheitsfunktionen wie beispielsweise Notabschaltungen und ähnliches bereit. Beispielsweise ist die Recheneinheit 150 als speicherprogrammierbare Steuerung, SPS, ausgebildet.

- 2 0 Die zweite Recheneinheit 160 ist kommunikativ mit der ersten Recheneinheit 150 gekoppelt. Im Schritt 162 wartet die zweite Recheneinheit 160 auf eine Nachricht von der ersten Recheneinheit. S_1, wartet also auf ein Steuertelegramm von der SPS. Die erste Recheneinheit 150 versendet periodisch Nachrichten mit aktuellen Steuerbefehlen und Sensordaten an die zweite Recheneinheit 160. Umfasst die Nachricht Soll-Größen, welche von der ersten Recheneinheit 150 beispielsweise über die Joystick-Eingabe vom Steuerpult oder der Funkfernbedienung vorgegeben werden, so wird ausgehend von einem Schritt 164 in den Block 110 aus Figur 1 gewechselt und die Regelung durchgeführt. Im Schritt 166 wird überprüft, ob eine manuelle Aktivierung der Regelung angefordert wurde. Ist dies der Fall, so wird der Block 110 aktiviert.

- 2 5 In einem Schritt 168 wird überprüft, ob eine Nachregelung erfolgen muss. Wenn beispielsweise keine Nachricht von der ersten Recheneinheit vorliegt, wird überprüft, ob Ist-Größen oder daraus abgeleitete Größen einen vorgegebenen Schwellwert überschreiten. Ist dies der Fall, dann wird der Block 110 aktiviert. Die Anforderung zur Nachregelung wird beispielsweise dann ermittelt, wenn der Drehwinkel θ der Laufkatze LK, des ersten Pendelwinkels oder des zweiten Pendelwinkels einen jeweils zugeordneten Schwellwert überschreiten. Eine Nachregelung wird also dann durchgeführt, wenn die Bewegung der Last nach dem Ausbleiben eines Steuerbefehls noch nicht beendet worden ist. Um das Pendeln der Last zu vermeiden wird eine Nachfahrt der Last veranlasst.

- 3 0 Der Block 110 ermittelt Stellgrößen, die in einem Schritt 170 an die erste Recheneinheit übergeben werden, um an die Kranantriebe weitergeleitet zu werden. Die Ermittlung der Stellgrößen u_{LK} , u_{DW} , u_{HW} über den Block 110 wird also dann aktiviert, wenn wenigstens eine der folgenden Bedingungen eintritt: Vorliegen 164 der Soll-Größe S'_{soll} ungleich Null; Vorliegen 166 einer von einer Bedieneinheit 900 stammenden manuellen Aktivierung der Ermittlung 110 der Stellgröße; und Vorliegen 168 einer Anforderung zur Nachregelung.

Patentansprüche

1. Ein Turmdrehkran (2) umfassend:
- 5 einen Turm (T) mit einer Hochachse (H);
- einen vom Turm (T) abragenden Katzausleger (KA);
- ein Drehwerk (DW) zum Drehen zumindest des Katzauslegers (KA) um die Hochachse (H);
- eine Sensoreinrichtung (510) zur Ermittlung eines Drehwinkels (θ_u) des Katzauslegers (KA) um die Hochachse (H);
- 1 0 eine entlang des Katzauslegers (KA) verfahrbare Laufkatze (LK) mit wenigstens einer ersten und einer zweiten Umlenkrolle (202, 204) für ein Hubseil (HSL);
- ein Lastaufnahmemittel (UF) mit wenigstens einer Umlenkrolle (302) für das Hubseil (HSL);
- eine an dem Lastaufnahmemittel (UF) angeordnete Sensoreinrichtung (310) zur Ermittlung wenigstens eines ersten Auslenkungswinkels (φ_{2x} , φ_{2y}) des Lastaufnahmemittels (UF) zum durch das Lastaufnahmemittel (UF) verlaufenden Lot;
- 1 5 das Hubseil (HSL), welches ausgehend von einem Hubwerk (HW) wenigstens über die erste Umlenkrolle (202) der Laufkatze (LK), die wenigstens eine Umlenkrolle (302) des Lastaufnahmemittels (UF) und die zweite Umlenkrolle (204) der Laufkatze (LK) geführt ist, und welches an einem distalen Abschnitt (4) des Katzauslegers (KA) befestigt ist;
- 2 0 das Hubwerk (HW);
- eine an der Laufkatze (LK) angeordnete Sensoreinrichtung (210) zur Ermittlung wenigstens eines zweiten Auslenkungswinkels (φ_{1y} , φ_{ux}) wenigstens eines zwischen der Laufkatze (LK) und dem Lastaufnahmemittel (UF) befindlichen Abschnitts (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HS) zum durch die Laufkatze (LK) verlaufenden Lot;
- ein Katzfahrwerk (KW), welches mittels eines Katzseils (KSL) mit der Laufkatze (LK) zu deren Bewegung
- 2 5 entlang des Katzauslegers (KA) verbunden ist;
- eine Sensoreinrichtung (410) zur Ermittlung einer Drehwinkeldifferenz ($\Delta\theta$) zwischen dem Drehwinkel (θ_u) des Katzauslegers (KA) um die Hochachse (H) und dem Drehwinkel (θ) der Laufkatze (LK) um die Hochachse (H);
- und

einer Steuerungseinheit (100), welche das Drehwerk (DW), das Hubwerk (HW) und das Katzfahrwerk (KW) in Abhängigkeit von wenigstens dem Drehwinkel (θ_u), in Abhängigkeit von dem wenigstens einen ersten Auslenkungswinkel (φ_{2x} , φ_{2y}), in Abhängigkeit von dem wenigstens einen zweiten Auslenkungswinkel (φ_{1y} , φ_{ux}) und in Abhängigkeit von der Drehwinkeldifferenz ($\Delta\theta$) betreibt.

- 5 2. Der Turmdrehkran (2) gemäß dem Anspruch 1,

wobei die Sensoreinrichtung (410) zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz ($\Delta\theta$) feststehend zum Katzausleger (KA), insbesondere an dem Katzausleger (KA) oder an einem Gestell (402) des Katzfahrwerks (KW), angeordnet ist.
3. Der Turmdrehkran (2) gemäß dem Anspruch 1 oder 2,

1 0 wobei ein von der Sensoreinrichtung (410) zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz ($\Delta\theta$) erzeugtes Sensorsignal einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung (410) und einem Abschnitt (KSL#1) des Katzseils (KSL), welcher sich zwischen einer proximalen zum Katzausleger (KA) feststehenden Umlenkrolle (6) und der Laufkatze (LK) befindet, repräsentiert;

1 5 wobei die Drehwinkeldifferenz ($\Delta\theta$) mittels der Steuerungseinheit (100) in Abhängigkeit von dem den Abstand repräsentierenden Sensorsignal ermittelt wird.
4. Der Turmdrehkran (2) gemäß einem der vorigen Ansprüche, wobei die Sensoreinrichtung (410) zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz ($\Delta\theta$) ausgehend vom Turm (T) in einer ersten bzw. proximalen Hälfte, insbesondere im ersten bzw. proximalen Drittel, der Länge des Katzauslegers (KA) angeordnet ist.
5. Der Turmdrehkran (2) gemäß einem der vorigen Ansprüche,

2 0 wobei ein von der Sensoreinrichtung (210) zur Ermittlung des wenigstens einen zweiten Auslenkungswinkels (φ_{1y} , φ_{ux}) erzeugtes Sensorsignal einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung (210) und dem wenigstens einen Abschnitt (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) repräsentiert; und

wobei der wenigstens eine zweite Auslenkungswinkel (φ_{1y} , φ_{ux}) mittels der Steuerungseinheit (100) in Abhängigkeit von dem den Abstand repräsentierenden Sensorsignal ermittelt wird.
- 2 5 6. Der Turmdrehkran (2) gemäß einem der vorigen Ansprüche umfassend:

eine weitere an der Laufkatze (LK) angeordnete Sensoreinrichtung (220) zur Ermittlung wenigstens eines Neigungswinkels ($\Delta\varphi$) der Laufkatze (LK) zu einer Horizontalen; und

wobei die Steuerungseinheit (100) das Drehwerk (DW), das Hubwerk (HW) und das Katzfahrwerk (KW) zusätzlich in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Neigungswinkel ($\Delta\varphi$) betreibt.

7. Ein Verfahren zum Betreiben eines Turmdrehkrans (2) umfassend:
- Ermitteln (1002) wenigstens eines ersten Pendelwinkels (φ_x), welcher eine Auslenkung eines virtuellen Schwerpunkts eines an der Laufkatze (LK) aufgehängten Mehrfachpendels zu einem durch die Laufkatze (LK) verlaufenden Lot in einer ersten Raumebene (xh) charakterisiert;
- 5 Ermitteln (1004) wenigstens eines zweiten Pendelwinkels (φ_y), welcher eine Auslenkung des Schwerpunkts des Mehrfachpendels zu dem durch die Laufkatze (LK) verlaufenden Lot in einer zweiten Raumebene (yh) charakterisiert;
- Ermitteln (1006) wenigstens eines Drehwinkels (θ) der Laufkatze (LK) um die Hochachse (H) des Turms (T); und
- 10 Ermitteln (110; 1010) wenigstens einer Stellgröße (u_{LK} , u_{DW} , u_{HW}) zum Betreiben des Turmdrehkrans (2), insbesondere mittels wenigstens eines Drehwerks (DW), wenigstens eines Hubwerk (HW) und wenigstens eines Katzfahrwerks (KW), in Abhängigkeit von dem wenigstens einen ersten Pendelwinkel (φ_x), in Abhängigkeit von dem wenigstens einen zweiten Pendelwinkel (φ_y) und in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Drehwinkel (θ).
8. Das Verfahren gemäß dem Anspruch 7 umfassend:
- 15 Ermitteln (210) eines in der ersten Ebene (xh) liegenden Auslenkungswinkels (φ_{ux}) wenigstens eines zwischen der Laufkatze (LK) und dem Lastaufnahmemittel (UF) befindlichen Abschnitts (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) zum durch die Laufkatze (LK) verlaufenden Lot;
- Ermitteln (310) eines in der ersten Ebene (xh) liegenden Auslenkungswinkels (φ_{2x}) des Lastaufnahmemittels (UF), welches über das Hubseil (HS) an der Laufkatze (LK) hängt, zum durch das Lastaufnahmemittel (UF) verlaufenden Lot; und
- 20 wobei der erste Pendelwinkel (φ_x) in Abhängigkeit von dem in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkel (φ_{ux}) des wenigstens einen Abschnitts (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) und in Abhängigkeit von dem in der ersten Ebene (xh) liegenden Auslenkungswinkels (φ_{2x}) des Lastaufnahmemittels (UF) ermittelt wird.
9. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 7 bis 8 umfassend:
- 25 Ermitteln (1012) eines ersten Gewichtungsfaktors (k_x) in Abhängigkeit von einer Pendellänge (l); und
- wobei der erste Pendelwinkel (φ_x) durch Gewichtung des in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels (φ_{ux}) des Abschnitts (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) in Abhängigkeit von dem ersten Gewichtungsfaktor (k_x) und durch Gewichtung des in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels (φ_{2x}) des Lastaufnahmemittels (UF) in Abhängigkeit von dem ersten Gewichtungsfaktor (k_x) ermittelt wird.
- 30 10. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 7 bis 9 umfassend:

Ermitteln (220) eines Neigungswinkels ($\Delta\phi$) der Laufkatze (LK) zur Horizontalen;

Ermitteln (1014) eines in der ersten Ebene (xh) liegenden kompensierten Auslenkungswinkels (ϕ_{1x}) in Abhängigkeit von dem Neigungswinkel ($\Delta\phi$) der Laufkatze (LK) und in Abhängigkeit von dem in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkel (ϕ_{ux}) des wenigstens einen Abschnitts (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL);

wobei der erste Pendelwinkel (ϕ_x) in Abhängigkeit von dem in der ersten Ebene liegenden kompensierten Auslenkungswinkel (ϕ_{ux}) des wenigstens einen Abschnitts (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) und in Abhängigkeit von dem in der ersten Ebene liegenden Auslenkungswinkels (ϕ_{2x}) des Lastaufnahmemittels (UF) ermittelt wird.

1 0 11. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 7 bis 10 umfassend:

Ermitteln (210) eines in der zweiten Ebene (yh) liegenden Auslenkungswinkels (ϕ_{1y}) des wenigstens einen zwischen der Laufkatze (LK) und dem Lastaufnahmemittel (UF) befindlichen Abschnitts (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) zum durch die Laufkatze (LK) verlaufenden Lot;

1 5 Ermitteln (310) eines in der zweiten Ebene (yh) liegenden Auslenkungswinkels (ϕ_{2y}) des Lastaufnahmemittels (UF), welches über das Hubseil (HSL) an der Laufkatze (LK) hängt, zum durch das Lastaufnahmemittel (UF) verlaufenden Lot; und

wobei der zweite Auslenkungswinkel (ϕ_y) in Abhängigkeit von dem in der zweiten Ebene (yh) liegenden Auslenkungswinkel (ϕ_{1y}) und in Abhängigkeit von dem in der zweiten Ebene liegenden Auslenkungswinkel (ϕ_{2y}) des Lastaufnahmemittels (UF) ermittelt wird.

2 0 12. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 7 bis 11 umfassend:

Ermitteln (1022) eines zweiten Gewichtungsfaktors (k_y) in Abhängigkeit von der Pendellänge (l); und

2 5 wobei der zweite Auslenkungswinkel (ϕ_y) durch Gewichtung des in der zweiten Ebene (yh) liegenden Auslenkungswinkel (ϕ_{1y}) des wenigstens einen Abschnitts (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) in Abhängigkeit von dem zweiten Gewichtungsfaktor (k_y) und durch Gewichtung des in der zweiten Ebene (yh) liegenden Auslenkungswinkels (ϕ_{2y}) des Lastaufnahmemittels (UF) in Abhängigkeit von dem zweiten Gewichtungsfaktor (k_y) ermittelt wird.

13. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 7 bis 12 umfassend:

Ermitteln (310) einer Länge (l₁) eines der Abschnitte (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) zwischen der Laufkatze (LK) und dem Lastaufnahmemittel (UF); und

Ermitteln (1024) der Pendellänge (l) in Abhängigkeit von der Länge (l_1) des einen der Abschnitte (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) und einer vorab festgelegten, insbesondere manuell während des Betriebs vorgebbaren, Länge (l_k) eines Lastseils (LSL) zwischen dem Lastaufnahmemittel (UF) und der Last (L).

14. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 7 bis 13 umfassend:
- 5 Ermitteln (510) eines Drehwinkels (θ_u) des Katzauslegers (KA) um die Hochachse (H);
- Ermitteln (410) einer Drehwinkeldifferenz ($\Delta\theta$) zwischen dem Drehwinkel (θ_u) des Katzauslegers (KA) um die Hochachse (H) und dem Drehwinkel (θ) der Laufkatze (LK) um die Hochachse (H); und
- wobei der Drehwinkel (θ) der Laufkatze (LK) um die Hochachse (H) des Turms (T) in Abhängigkeit von dem Drehwinkel (θ_u) des Katzauslegers (KA) und in Abhängigkeit von der Drehwinkeldifferenz ($\Delta\theta$) ermittelt wird.
- 1 0 15. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 7 bis 14, wobei die Ermittlung (110) der wenigstens einer Stellgröße (u_{LK} , u_{DW} , u_{HW}) dann aktiviert wird, wenn wenigstens eine der folgenden Bedingungen eintritt:
- Vorliegen (164) wenigstens einer Soll-Größe (S'_{soll}) ungleich Null;
- Vorliegen (166) einer von einer Bedieneinheit (900) stammenden manuellen Aktivierung der Ermittlung (110) der wenigstens einer Stellgröße; und
- 1 5 Vorliegen (168) einer Anforderung zur Nachregelung.
16. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 7 bis 15 umfassend:
- Aktualisieren (1030) eines Modells, insbesondere von das Modell charakterisierenden Matrizen (A, B), in Abhängigkeit von der Pendellänge (l), einer Position (x) der Laufkatze (LK) und in Abhängigkeit von, insbesondere mittels einer Sensoreinrichtung (620) ermittelten mit dem Mehrfachpendel assoziierten Masse (m);
- 2 0 und
- wobei das Ermitteln (1010) der wenigstens einer Stellgröße (u_{LK} , u_{DW} , u_{HW}) in Abhängigkeit von dem aktualisierten Modell durchgeführt wird.
17. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 7 bis 16 umfassend:
- Aktualisieren (1032) eines Reglers, insbesondere von Verstärkungsfaktoren (K'), in Abhängigkeit von dem Modell, insbesondere von den das Modell charakterisierenden Matrizen (A, B), und in Abhängigkeit von der Pendellänge (l); und
- 2 5 wobei das Ermitteln (1010) der wenigstens einer Stellgröße (u_{LK} , u_{DW} , u_{HW}) in Abhängigkeit von dem aktualisierten Regler durchgeführt wird.

18. Eine Steuerungseinheit (100) zum Betreiben eines Turmdrehkrans (2) umfassend:
- Mittel (1002) zur Ermittlung wenigstens eines ersten Pendelwinkels (φ_x), welcher eine Auslenkung eines virtuellen Schwerpunkts eines an einer Laufkatze (LK) aufgehängten Mehrfachpendels zu einem durch die Laufkatze (LK) verlaufenden Lot in einer ersten Raumbene (x_h) charakterisiert;
- 5 Mittel (1004) zur Ermittlung wenigstens eines zweiten Pendelwinkels (φ_y), welcher eine Auslenkung des Schwerpunkts des Mehrfachpendels zu dem durch die Laufkatze (LK) verlaufenden Lot in einer zweiten Raumbene (y_h) charakterisiert;
- Mittel (1006) zur Ermittlung wenigstens eines Drehwinkels (θ) der Laufkatze (LK) um die Hochachse (H) des Turms (T); und
- 1 0 Mittel (110; 1010) zur Ermittlung wenigstens einer Stellgröße (u_{LK} , u_{DW} , u_{HW}) zum Betreiben des Turmdrehkrans (2), insbesondere mittels wenigstens eines Drehwerks (DW), wenigstens eines Hubwerk (HW) und wenigstens eines Katzfahrwerks (KW) des Turmdrehkrans (2), in Abhängigkeit von dem wenigstens einen ersten Pendelwinkel (φ_x), in Abhängigkeit von dem wenigstens einen zweiten Pendelwinkel (φ_y) und in Abhängigkeit von dem wenigstens einen Drehwinkel (θ).
- 1 5 19. Eine Laufkatze (LK) für einen Turmdrehkran (2) umfassend:
- ein Fahrgestell (206) zum Verfahren der Laufkatze (LK) entlang eines Katzauslegers (KA);
- wenigstens zwei zum Fahrgestell (206) feststehend angeordnete Umlenkrollen (202, 204) zum Umlenken eines Hubseils (HSL) in Richtung eines Lastaufnahmemittels (UF); und
- 2 0 eine zum Fahrgestell (206) feststehend angeordnete Sensoreinrichtung (210) zur Ermittlung wenigstens eines Auslenkungswinkels (φ_{1y} , φ_{ux}) eines zwischen der Laufkatze (LK) und einem Lastaufnahmemittel (UF) befindlichen Abschnitts (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) zum durch die Laufkatze (LK) verlaufenden Lot.
20. Die Laufkatze (LK) gemäß dem Anspruch 19,
- wobei wenigstens ein von der Sensoreinrichtung (210) erzeugtes Sensorsignal einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung (210) und wenigstens einem Abschnitt (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) repräsentiert.
- 2 5 21. Die Laufkatze (LK) gemäß einem der Ansprüche 19 bis 20,
- wobei dem wenigstens einen Abschnitt (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) wenigstens zwei Sensoren (214#1, 216#1; 214#2, 216#2) zugeordnet sind, welche aus unterschiedlichen Winkeln auf den Abschnitt (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) gerichtet sind.
22. Die Laufkatze (LK) gemäß einem der Ansprüche 19 bis 21,

wobei die Sensoreinrichtung (210) zumindest zu einem Teil zwischen den wenigstens zwei Abschnitten (HSL#1, HSL#2) des Hubseils (HSL) angeordnet ist.

23. Die Laufkatze (LK) gemäß einem der Ansprüche 19 bis 22 umfassend:

5 wenigstens eine weitere zum Fahrgestell (206) feststehend angeordnete Sensoreinrichtung (220) zur Erzeugung wenigstens eines weiteren Sensorsignals, welches eine Neigung der Laufkatze (LK) zu einer Horizontalen charakterisiert.

24. Ein Katzfahrwerk (KW) zur Anordnung an einem Katzausleger (KA) eines Turmdrehkrans (2) umfassend:

ein Gestell (402);

1 0 eine zum Gestell (402) feststehend angeordnete Antriebseinheit zum Auf- und Abrollen eines Katzseils (KSL); und

eine zum Gestell (402) feststehend angeordnete Sensoreinrichtung (410) zur Ermittlung einer Drehwinkeldifferenz ($\Delta\theta$) zwischen einem Drehwinkel (θ_u) des Katzauslegers (KA) um eine Hochachse (H) eines Turms (T) des Turmdrehkrans (2) und einem Drehwinkel der Laufkatze (LK) um die Hochachse (H).

25. Das Katzfahrwerk (KW) gemäß dem vorigen Anspruch,

1 5 wobei ein von der Sensoreinrichtung (410) erzeugtes Sensorsignal zur Ermittlung der Drehwinkeldifferenz ($\Delta\theta$) einen Abstand zwischen der Sensoreinrichtung (410) und einem Abschnitt (KSL#1) des Katzseils (KSL) repräsentiert.

26. Eine Verwendung des Turmdrehkrans (2) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6, des Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 7 bis 17, der Steuerungseinheit (100) gemäß dem Anspruch 18, der Laufkatze (LK) gemäß
2 0 einem der Ansprüche 19 bis 23 oder des Katzfahrwerks (KW) gemäß Anspruch 24 oder 25.