

Simulationsgestützte Untersuchung von Steuerungsstrategien für Krane in Parksystemen

Bei der Fakultät Maschinenbau der
Technischen Universität Dortmund
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jörg Eller

aus Castrop-Rauxel

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne

Mitberichter: Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Reinhardt Jünemann

Mündliche Prüfung: 5. März 2010

Gewidmet meiner Mutter(†)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als Stipendiat an der Graduate School of Production Engineering and Logistics und meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Dortmund am Fachgebiet Maschinenelemente entstanden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. B. Künne, dem Leiter des Fachgebiets Maschinenelemente, gilt mein besonderer Dank für die ausgezeichnete fachliche und persönliche Unterstützung. Er hat mich seit dem Beginn meiner Tätigkeit als studentische Hilfskraft unterstützt und gefördert, und einen entscheidenden Beitrag für meine fachliche und auch persönliche Entwicklung beigetragen.

Ebenso danke ich sehr herzlich Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. R. Jünemann dafür, dass er diese Arbeit mit angeregt hat und mich während der Bearbeitung permanent fachlich und persönlich unterstützt und gefördert hat. Seiner engagierten und freundlichen Betreuung verdanke ich, dass diese Arbeit zielführend und zügig bearbeitet werden konnte. Er hat außerdem freundlicherweise den Mitbericht übernommen, wofür ich ihm auch ganz besonders danke.

Den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission, Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Clausen als Vorsitzender und Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Fittinghoff, möchte ich für die angenehme Atmosphäre während der mündlichen Prüfung danken, die mir diese erheblich erleichtert hat.

Mein weiterer Dank gilt allen meinen Kollegen am Fachgebiet Maschinenelemente, die durch ihre Hilfsbereitschaft und den großen Zusammenhalt ein Arbeitsklima geschaffen haben, das für eine gute und erfolgreiche wissenschaftliche Arbeit die notwendige Motivation schafft. Darüber hinaus danke ich den beteiligten technischen Angestellten, den studentischen Hilfskräften sowie den Studien- und Diplomarbeitern, die durch ihr persönliches Engagement das Forschungsvorhaben vorangetrieben haben.

Ganz besonders herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die mir diesen Weg ermöglicht haben und mich in der gesamten Zeit ermutigten und unterstützten. Ebenso danke ich meiner Lebensgefährtin Simone Kosbab dafür, dass sie mich oftmals aufgemuntert hat und mir durch ihr Verständnis und eigene Entbehrungen beigestanden ist.

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Stand der Technik | 3 |
| 2.1 | Systematik automatischer Parksyste me | 3 |
| 2.1.1 | Nutzerschnittstellen in automatischen Parksyste men | 4 |
| 2.1.2 | Lagermittel in automatischen Parksyste men | 6 |
| 2.1.3 | Primärfördertechnik in automatischen Parksyste men | 8 |
| 2.1.4 | Sekundärfördertechnik in automatischen Parksyste men | 9 |
| 2.2 | Automatisierte Krane | 10 |
| 2.2.1 | Systematik der Lastführungen | 11 |
| 2.2.2 | Aufbau und Funktion von mechanischen Lastpendeldä mpfungen | 12 |
| 2.2.3 | Aufbau und Funktion von elektronischen Lastpendeldä mpfungen | 13 |
| 3 | Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise | 15 |
| 3.1 | Problemstellung | 15 |
| 3.2 | Zielsetzung | 16 |
| 3.3 | Vorgehensweise | 17 |
| 4 | Steuerungsstrategien zur Lastpendeldämpfung | 18 |
| 4.1 | Steuerungsstrategien für konstante Trage seillängen | 19 |
| 4.1.1 | Globaler Lastpendelausgleich | 20 |
| 4.1.2 | Lokaler Lastpendelausgleich | 22 |
| 4.2 | Steuerungsstrategien für eine veränderliche Trage seillänge | 25 |
| 5 | Mathematische Modellbildung | 30 |
| 5.1 | Parallele Trage seilanordnung | 31 |
| 5.2 | Trapezfö rmige Trage seilanordnung | 32 |
| 5.3 | Implementierung der mathematischen Modelle im Simulator | 36 |
| 6 | Durchführung und Auswertung der Simulation | 40 |
| 6.1 | Simulation von Steuerungsstrategien für Krane mit paralleler Trage seilanordnung und konstanter Trage seillänge während des Verfahrens | 41 |
| 6.1.1 | Positionierungszeiten | 41 |
| 6.1.2 | Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens | 42 |
| 6.1.3 | Maximale Pendelauslenkung nach dem Verfahren unter der Berücksichtigung von kinematischen Toleranzen | 43 |
| 6.2 | Simulation von Steuerungsstrategien für trapezfö rmige Trage seilanordnungen mit konstanter Trage seillänge während des Verfahrens | 47 |
| 6.2.1 | Positionierungszeiten | 47 |
| 6.2.2 | Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens | 50 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.2.3 | Maximale Pendelauslenkung nach dem Verfahren unter der Berücksichtigung von kinematischen Toleranzen | 51 |
| 6.3 | Simulation von Steuerungsstrategien mit paralleler Tragseilanordnung und variabler Tragseillänge | 54 |
| 6.3.1 | Positionierungszeit..... | 56 |
| 6.3.2 | Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens | 58 |
| 6.3.3 | Maximale Pendelauslenkung nach dem Verfahren unter der Berücksichtigung kinematischer Toleranzen | 59 |
| 6.4 | Simulation von Steuerungsstrategien für trapezförmige Tragseilanordnungen mit variabler Tragseillänge während des Verfahrens..... | 64 |
| 6.4.1 | Positionierungszeit..... | 64 |
| 6.4.2 | Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens | 65 |
| 6.4.3 | Maximale Pendelauslenkung nach dem Verfahren unter der Berücksichtigung kinematischer Toleranzen | 66 |
| 6.5 | Zusammenfassung der Simulationsergebnisse | 71 |
| 7 | Validierung der Simulationsmodelle und –ergebnisse | 76 |
| 7.1 | Konstruktiver Aufbau des Labormodells..... | 76 |
| 7.2 | Messung des Lastpendelns bei einer konstanter Tragseillänge während des Verfahrens..... | 79 |
| 7.3 | Messung des Lastpendelns bei einer variablen Tragseillänge während des Verfahrens..... | 85 |
| 7.4 | Einfluss geometrischer Toleranzen..... | 90 |
| 7.4.1 | Einfluss geometrischer Toleranzen auf die Pendelschwingungen in der x - z -Koordinatenebene | 90 |
| 7.4.2 | Einfluss geometrischer Toleranzen auf das Lastpendeln in der x - y -Koordinatenebene..... | 94 |
| 7.5 | Zusammenfassung zur Validierung | 98 |
| 8 | Systematische Entwicklung einer Positionierungsvorrichtung..... | 100 |
| 8.1 | Ausgangsbedingungen | 100 |
| 8.2 | Funktionsstruktur der Positionierungsvorrichtung | 102 |
| 8.3 | Entwicklung von Prinziplösungen | 103 |
| 8.4 | Bewertung der Prinziplösungen..... | 108 |
| 8.5 | Bestimmung der Systemparameter | 111 |
| 8.6 | Konstruktion eines LAM mit Positionierungsvorrichtung | 114 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 116 |
| | Literaturverzeichnis | 119 |
| | Abkürzungen und Formelzeichen | 125 |
| | Abbildungs- und Tabellenverzeichnis..... | 128 |
| | Anhang..... | 137 |

1 Einleitung

Die Idee des automatisierten Parkens ist nahezu ebenso alt wie das Automobil selbst. Erste Entwicklungen zu automatisierten Parksystemen stammen aus dem Jahr 1906 und wurden in den USA patentiert /PAT06/. Das erste realisierte Parksystem, bei dem Aufzüge zum Transport der PKWs innerhalb des Parksystems eingesetzt worden sind, wurde 1926 in der Stadt New York (USA) in Betrieb genommen. Dieses teilautomatisierte Parksystem verfügte bereits über eine Kapazität von 1.000 Stellplätzen /CHR00/. Der Grundgedanke für die Entwicklung und den Bau von automatisierten Parksystemen in Großstädten war die Reduzierung der benötigten Baufläche, wodurch eine Einsparung von Kosten für Grundstücke erreicht werden sollte.

Der günstige Flächen- und Volumenbedarf gegenüber konventionellen Parksystemen ist auch heute noch die größte Motivation für die Realisierung von automatisierten Parksystemen. Zudem können automatisierte Parksysteme auf Grundstücksflächen erbaut werden, auf denen konventionelle Parksysteme gar nicht oder nur mit sehr geringer Stellplatzkapazität errichtet werden können /FGS95/. Weitere Vorteile von automatisierten Parksystemen im Vergleich zu konventionellen Parksystemen sind:

- Geringe Gesamtkosten bei hohen Grundstückskosten
- Kurze Bauzeiten
- Hohe Sicherheit für die Fahrzeuge
- Kurze Wege für die Nutzer
- Geringe Abgas-Emissionen
- Große Kapazitäten oder kleiner Flächen- und Raumbedarf
- Gute Ausnutzung von Innenhöfen oder Baulücken

Die Nachteile von vollautomatischen Parksystemen sind hohen Investitionskosten beim Bau und die geringere Leistungsfähigkeit im Vergleich zu konventionellen Parkhäusern. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Nutzer von automatisierten Parksystemen eine maximale Wartezeit von 5 min akzeptieren /KIR94/. Bei konventionellen Parkhäusern wird dieser Grenzwert erst ab einer Systembelastung von 600 PKW/Tag im Berufsverkehr erreicht. Vergleichbare automatisierte Parksysteme erreichen die maximal tolerierte Wartezeit bereits bei einer Systembelastung von max. 180 PKW/Tag. Die mittleren Nutzerzeiten in vollautomatisierten Parksystemen betragen zwischen 1,5 und 1,9 min beim Einfahren und 2,0 bis 2,7 min beim Ausfahren /FIT01/.

Aufgrund der benötigten Fördertechnik in automatisierten Parksystemen sind die Investitionskosten groß, im Vergleich zu konventionellen Parkhäusern. Für den Bau eines automatisierten Parksystems müssen ohne die Kosten für das Grundstück zwischen 15.000 bis 30.000 Euro

pro Stellplatz investiert werden. Dem gegenüber betragen die Baukosten für ein konventionelles Parkhaus zwischen 5.000 bis 15.000 Euro pro Stellplatz /PEC06/.

Der größte Kostenfaktor bei den fördertechnischen Komponenten von automatisierten Parksystemen ist das Primärfördermittel, welches die PKWs innerhalb des Parksystems zu den einzelnen Stellplätzen befördert. Bisher wurden unterschiedlichste Fördersysteme als Primärfördermittel in automatisierten Parksystemen eingesetzt. Dabei ist das Regalbediengerät (RBG), das am meisten eingesetzte Fördermittel in automatisierten Parksystemen /SAL00a/.

Ein Primärfördermittel, das ein erhebliches Kosteneinsparungspotential im Vergleich zum RBG besitzt, ist der automatisierte Kran. Der Kostenvorteil gegenüber RBG entsteht vor allem durch den einfacheren mechanischen Aufbau. Ein Nachteil hingegen ist das Lastpendeln. Zur Vermeidung des Lastpendelns werden derzeit elektronische Regelungen oder mechanisch wirkende Lastführungen eingesetzt. Aufgrund der hohen Kosten und der Komplexität der Lastpendeldämpfungen konnten sich automatisierte Krane als Primärfördermittel bisher nicht am Markt etablieren.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Kosten und der Komplexität von Lastpendeldämpfungen ist der Einsatz von Steuerungsstrategien, die ohne eine Rückführung von Störgrößen eine Lastpendeldämpfung ermöglichen. Mit Hilfe dieser Steuerungsstrategien können wesentlich kostengünstigere Steuerungen realisiert werden, die ohne eine aufwendige Messtechnik und mit einer hohen Verfügbarkeit dazu beitragen, dass die Vorteile von Kranen in automatisierten Parksystemen optimal genutzt werden. Darüber hinaus kann durch die geringere Komplexität der Steuerungen das Vertrauen und die Akzeptanz der Investoren in automatisierte Krane, als Primärfördermittel in Parksystemen, gesteigert werden.

Aus den genannten Gründen wird in dieser Arbeit der Einsatz von Steuerungsstrategien, ohne eine Rückführung von Störgrößen, für den Einsatz in automatisierten Parksystemen untersucht. Zu diesem Zweck werden Simulationen und Modellexperimenten durchgeführt. Als Ergebnis der Simulationen und Modellexperimente wird eine Aussage zu der Eignung von unterschiedlichen Steuerungsstrategien in automatisierten Parksystemen erarbeitet. Des Weiteren wird mit Hilfe der Simulationsergebnisse eine mechanisch wirkende Dämpfungsvorrichtung neu entwickelt, die ein Restpendeln nach der Positionierung schnell ausgleichen kann und somit die Leistungsfähigkeit von Kranen in automatisierten Parksystemen erhöht.

2 Stand der Technik

2.1 Systematik automatischer Parksysteme

Zur automatischen Ein- und Auslagerung von PKWs in ein Lager sind zahlreiche Systeme vorhanden. Die **Abb. 2.1** zeigt eine systematische Gliederung der realisierten automatischen Parksysteme. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale der automatischen Parksysteme sind der Automatisierungsgrad, die Art des Lagermittels und die Anordnung der PKWs im Lager. Des Weiteren wird bei den automatischen Parksystemen unterschieden zwischen einer statischen und einer dynamischen Lagerung von PKWs.

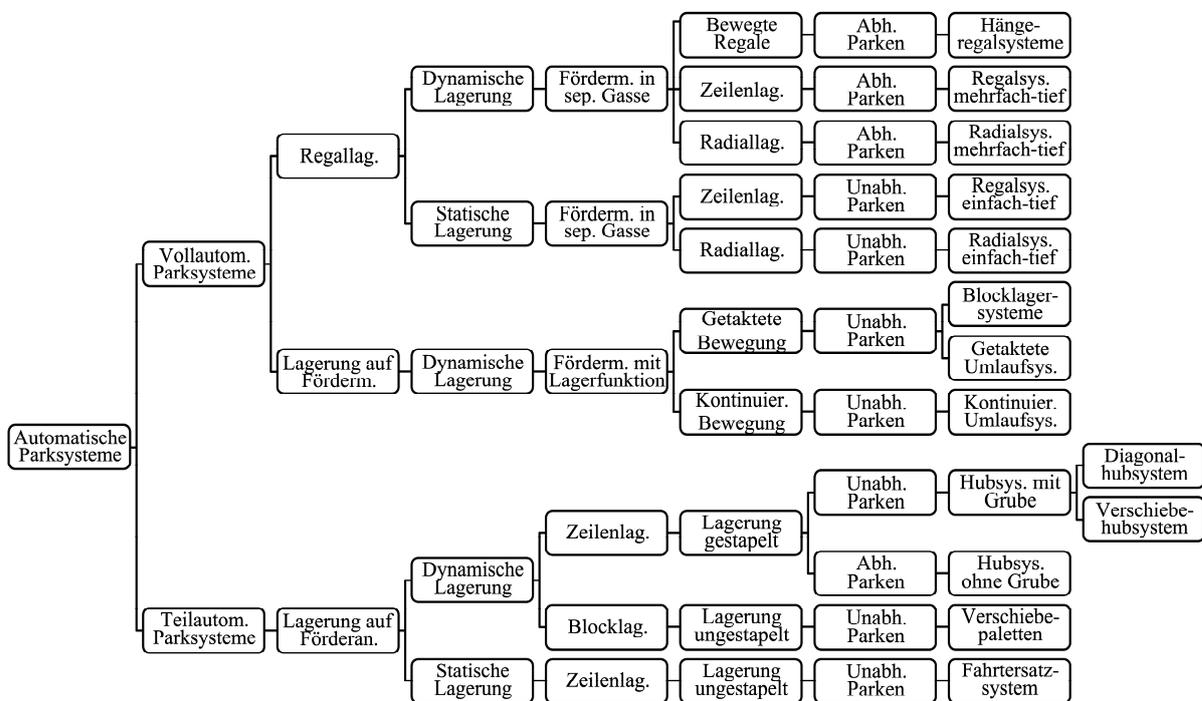


Abb. 2.1 Systematik der realisierten Parksysteme (in Anlehnung an /SAL00b/)

In vollautomatischen Parksystemen wird ein PKW zur Einlagerung von einem Nutzer in einer Nutzerschnittstelle abgegeben. Der Transport des PKW innerhalb des Parksystems und die Ein- bzw. Auslagerung erfolgen vollständig automatisiert. Die teilautomatischen Parksysteme unterscheiden sich von den vollautomatischen Parksystemen dadurch, dass die PKWs von den Nutzern durch den eigenen Antrieb zum Stellplatz oder einer Parkpalette gefahren werden müssen. Die Einlagerung auf einen Stellplatz erfolgt schließlich durch un stetig arbeitende Fördermittel /FIT01/.

In teil- und vollautomatischen Parksystemen werden die PKWs auf der Förderanlage, den Fördermitteln oder in einem Regal gelagert. Die Stellplätze für die PKWs können parallel

oder radial angeordnet sein und sich in einer oder mehreren Ebenen befinden. Des Weiteren gibt es automatische Parksysteme mit einfach-tiefen und mehrfach-tiefen Stellplätzen.

Die einfach-tiefen Stellplätze ermöglichen einen direkten Zugriff auf einen eingelagerten Pkw. Im Gegensatz dazu ist bei mehrfach-tiefen Stellplätzen nur ein indirekter Zugriff auf die Mehrzahl der eingelagerten PKWs möglich. Die Möglichkeit des direkten Zugriffs auf einen Pkw während der Einlagerungsdauer wird auch als unabhängiges Parken bezeichnet. Dem entsprechend beschreibt das abhängige Parken die Möglichkeit eines indirekten Zugriffs auf einen Pkw.

In teil- und vollautomatischen Parksystemen mit einer statischen Lagerung werden die PKWs zwischen der Ein- und Auslagerung nicht bewegt. Bei einer dynamischen Lagerung müssen die PKWs während der Einlagerung zwischenzeitlich bewegt werden /SAL00a/. Im Folgenden werden nur die vollautomatischen Parksysteme beschrieben.

In der **Abb. 2.2** ist die Funktionsstruktur mit den wesentlichen Teilfunktionen von vollautomatischen Parksystemen mit Regallagerung dargestellt. Bei vollautomatischen Parksystemen mit einer Lagerung der PKWs auf dem Fördermittel sind die Teilfunktionen „Transport des PKW“ und „Lagerung“ kombiniert. Die Teilfunktionen „Übergabe/Übernahme PKW vom Nutzer“ werden in den Nutzerschnittstellen durchgeführt. Durch die Sekundärfördertechnik erfolgt der Transfer der übergebenen PKWs an das Primärfördermittel und umgekehrt. Mit Hilfe des Primärfördermittels werden schließlich die PKWs zu den Lagerplätzen transportiert. In den folgenden Kapiteln werden die beschriebenen technischen Teilsysteme näher erläutert.

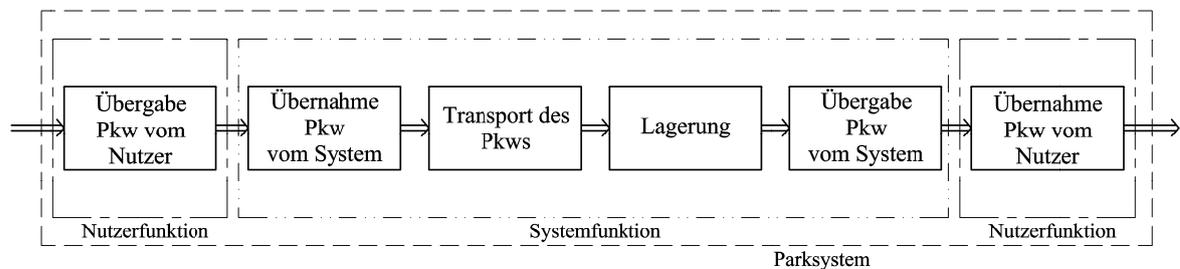


Abb. 2.2 Hauptfluss (Stofffluss) eines vollautomatischen Parksystems

2.1.1 Nutzerschnittstellen in automatischen Parksystemen

Die Hauptfunktion der Nutzerschnittstellen ist die Übergabe oder Übernahme der PKWs von den Nutzern. Dabei sollten die Nutzerschnittstellen so gestaltet sein, dass die Übergabe und Übernahme der PKWs sicher und komfortabel erfolgt. Aus diesem Grund sind die Nutzerschnittstellen i.d.R. so breit gestaltet, dass die Nutzer bequem die PKWs verlassen können. Durch die VDI-Richtlinie 4466 wird als Richtwert für die Breite der Einlagerungsstationen ein Wert von 3,5 m vorgegeben /VDI01/. Dabei sollte die Torbreite mindestens 2,5 m betra-

gen und die Torhöhe größer als 2 m sein. Des Weiteren sind die Nutzerschnittstellen i.d.R. so gestaltet, dass der Nutzer in die Nutzerschnittstelle vorwärts hinein und heraus fährt.

Damit eine Einlagerung der PKWs erfolgen kann, muss vor der Einlagerung durch das Parksystem geprüft werden, ob die PKWs die zulässigen Abmessungen nicht überschreiten und ausreichend genau in der Nutzerschnittstelle positioniert sind. Die Prüfung der PKW-Abmessung und Positionierung kann messtechnisch (z.B. durch Laserscanner, Lichtschranken o.ä.), durch mechanische Begrenzungen und/oder anhand einer Kontrolle durch den Nutzer erfolgen. Zur Sicherheit der Nutzer muss gewährleistet sein, dass ein unbefugtes Betreten des Parksystems während der Übergabe und Übernahme nicht möglich ist. Darüber hinaus dürfen sich während der Übernahme der PKWs durch das System keine Nutzer innerhalb der Nutzerschnittstelle und dem PKW aufhalten. Dies kann einfach durch eine Bestätigung des Nutzers an dem Bedienterminal geprüft werden.

Neben den genannten Funktionen besitzen die Gestaltung und die Anzahl der Nutzerschnittstellen einen erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des gesamten automatischen Parksystems. Bei der Gestaltung der Nutzerschnittstellen wird unterschieden zwischen getrennten Nutzerschnittstellen für die Ein- und Auslagerung und kombinierten Nutzerschnittstellen, in denen PKWs an das System übergeben und von dem System übernommen werden können. Damit ein Nutzer beim Hinein- und Herausfahren in eine kombinierte Nutzerschnittstelle immer vorwärts fährt, müssen die PKWs durch entsprechende Vorrichtungen gedreht werden.

Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von automatisierten Parksystemen haben gezeigt, dass kombinierte Nutzerschnittstellen eine höhere Leistung ermöglichen als getrennte Nutzerschnittstellen /SAL02/. Darüber hinaus haben Untersuchungen ergeben, dass die Leistungsfähigkeit eines Parksystems, unabhängig von der Gestaltung der Nutzerschnittstellen und der verwendeten Primär- und Sekundärfördertechnik, mit der Anzahl der Nutzerschnittstellen steigt. Im Vergleich zum Einsatz von jeweils einer Nutzerschnittstelle für die Ein- und Auslagerung oder einer kombinierten Nutzerschnittstelle, kann die zulässige Systembelastung bei der Verdopplung der Anzahl an Nutzerschnittstellen um das Dreifache erhöht werden. Eine dritte kombinierte Nutzerschnittstelle oder jeweils drei Nutzerschnittstellen für die Ein- und die Auslagerung erhöhen die zulässige Systembelastung nochmals um das Doppelte. Eine weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit durch zusätzliche Nutzerschnittstellen ist bei den meisten Systemen nicht möglich.

2.1.2 Lagermittel in automatischen Parksystemen

Bei der Lagerung von PKWs auf Fördermitteln bilden Lager- und Fördermittel eine Einheit. Die Anordnung des Lager-/Fördermittels entspricht dabei meist denen von Umlauf- oder Blocklagersystemen. In Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Baufläche und den sonstigen Randbedingungen werden die Umlaufsysteme vertikal (s. **Abb. 2.3**) oder horizontal (s. **Abb. 2.4**) aufgebaut. Die Blocklagersysteme unterscheiden sich von den Umlaufsystemen dadurch, dass der Umlauf der einzelnen PKWs bei der Ein- und Auslagerung nicht genau festgelegt ist. Das bedeutet, dass die einzelnen Lagerplätze in Blocklagersystemen mindestens zwei voneinander unabhängige Bewegungsrichtungen besitzen.

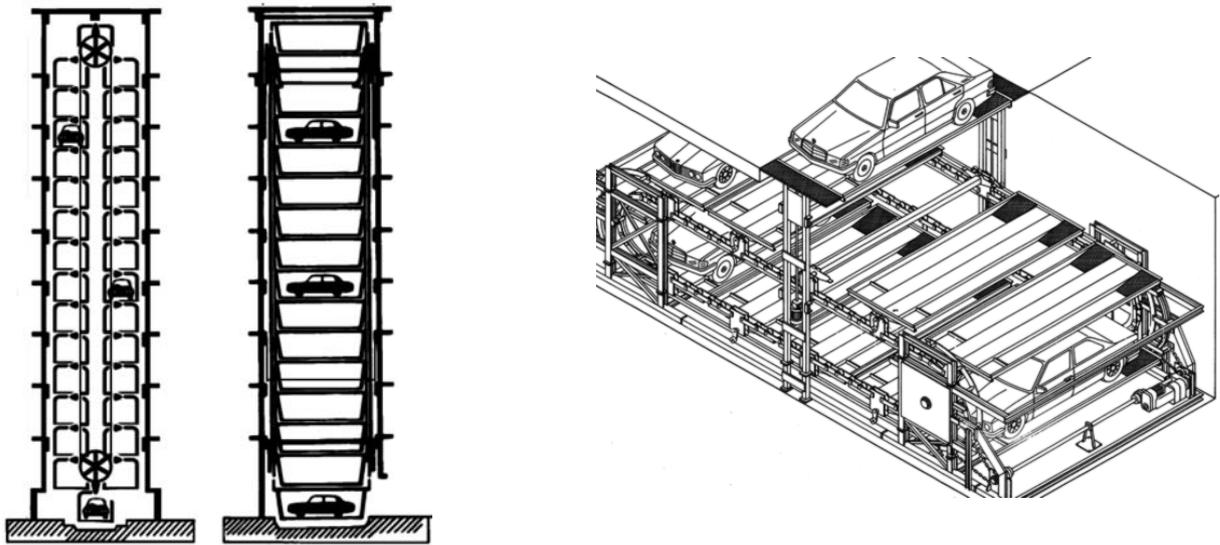


Abb. 2.3 Horizontales Umlaufsystem /PEC06/ **Abb. 2.4** Vertikales Umlaufsystem /PRI09/

Die vollautomatischen Parksysteme mit Regallagerung verwenden separate Lagermittel als Stellplätze für die PKWs. Durch den Einsatz von separaten Lagermitteln zur Lagerung von PKWs ist der technische Aufwand zur Realisierung dieser Systeme geringer als der technische Aufwand zur Realisierung von vollautomatischen Parksystemen mit einer Lagerung von PKWs auf Fördermitteln. Der Volumennutzungsgrad von vollautomatischen Parksystemen mit Regallagerung ist niedriger als der Volumennutzungsgrad von vollautomatischen Parksystemen mit einer Lagerung von PKWs auf Fördermitteln, da die Gassen für den Transport von PKWs mit den Fördermitteln nicht als Lagerraum genutzt werden können.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der vollautomatischen Parksysteme mit Regallagerung ist die Anordnung der Stellplätze. Es wird unterschieden zwischen der parallelen und der radialen Anordnung von einfach-tiefen oder mehrfach-tiefen Stellplätzen. Die Ein- und Auslagerung von PKWs in vollautomatischen Parksystemen mit paralleler und radialer Anordnung der Stellplätze erfolgt in Längs- oder Querrichtung.

Die **Abb. 2.5** bis **2.10** zeigen die möglichen Anordnungen der Stellplätze in vollautomatischen Parksystemen mit Regallagerung. Der Aufbau von Regalsystemen ist vergleichbar mit

dem Aufbau von Hochregallagern für Europaletten. Regalsysteme, die nur aus einem Zeilen- oder Stapelpaar bestehen, werden auch als Turmsysteme (s. **Abb. 2.6 bis 2.9**) bezeichnet. Im Gegensatz zu den Regalsystemen müssen die Fördermittel in Turmsystemen nur in horizontaler oder vertikaler Richtung (bei geschlossenen Turmsystemen ist noch eine zusätzliche Drehbewegung der PKWs notwendig) verfahren werden.

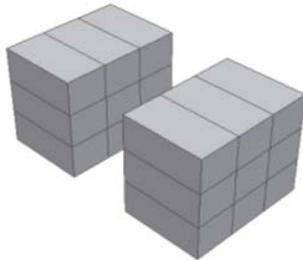


Abb. 2.5 Regalsystem

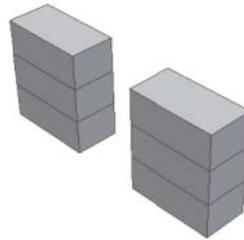


Abb. 2.6 Offener Turm

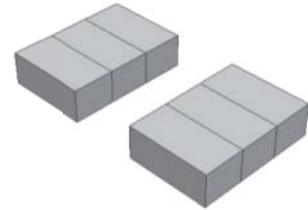


Abb. 2.7 Liegender Turm

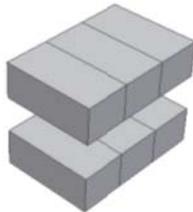


Abb. 2.8 Gekippter Turm

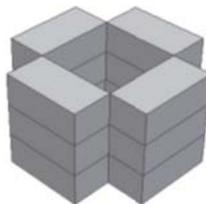


Abb. 2.9 Geschl. Turm

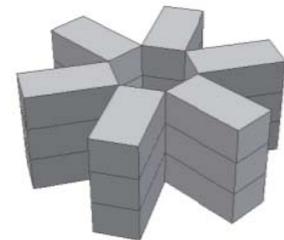


Abb. 2.10 Radialsystem

In der **Abb. 2.11** ist der innere Aufbau eines vollautomatischen Parksystems mit einer Regalanordnung der Stellplätze dargestellt. Die **Abb. 2.12** und **Abb. 2.13** zeigen den inneren Aufbau von vollautomatischen Parksystemen mit offener und geschlossener Turmanordnung der Stellplätze.

Die Stellplätze in Radialsystemen sind um eine gemeinsame Mittelachse angeordnet. Das Fördermittel verfährt auf der Mittelachse und muss über eine Drehvorrichtung verfügen, um PKWs ein- und auslagern zu können. Die **Abb. 2.10** zeigt die Anordnung der Lagerplätze in einem Radialsystem. In der **Abb. 2.14** ist der innere Aufbau eines vollautomatischen Parksystems mit radialer Anordnung der Stellplätze dargestellt.



Abb. 2.11 Regalsystem von innen /PAR06/



Abb. 2.12 Offenes Turmsystem /WÖH06a/



Abb. 2.13 Geschl. Turmsystem /WÖH06b/ Abb. 2.14 Radialsystem von innen /PAL06/

2.1.3 Primärfördertechnik in automatischen Parksystemen

Die eingesetzten Fördermittel zum Transport von PKWs in vollautomatischen Parksystemen mit paralleler Anordnung der Stellplätze sind verfahrbar oder ortsfest ausgeführt. Zur Ein- und Auslagerung müssen die PKWs von den Fördermitteln in horizontaler und vertikaler Richtung transportiert werden. Hinsichtlich des Ablaufs der Horizontal- und Vertikalbewegungen bei einem Lagervorgang wird unterschieden zwischen Fördermitteln, die Bewegungen orthogonal oder diagonal ausführen /SAL00a/. Die **Abb. 2.15** zeigt eine systematische Gliederung der Fördermittel in automatischen Parksystemen mit paralleler Anordnung der Stellplätze.

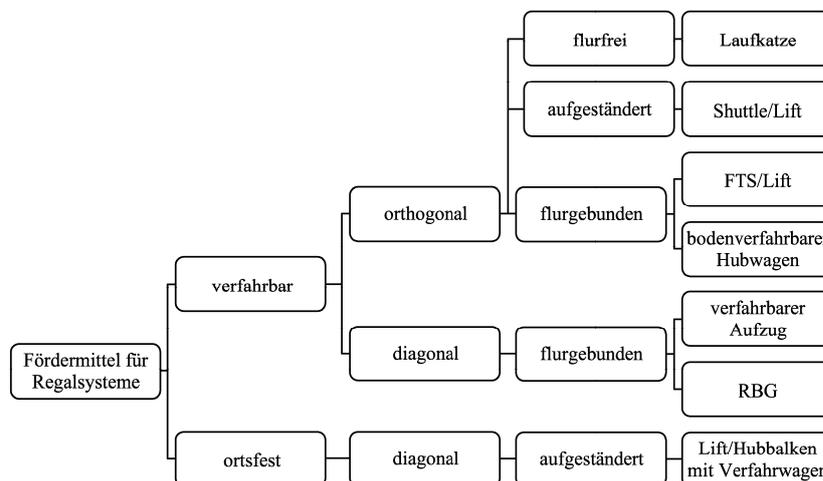


Abb. 2.15 Systematische Gliederung der Fördermittel in Regalsystemen mit paralleler Anordnung der Stellplätze /SAL00a/

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal der Fördermittel in vollautomatischen Parksystemen mit Regallagerung ist die Lage der Verfahrebene. Es wird unterschieden zwischen flurgebundenen, flurfreien und aufgeständerten Fördermitteln. Die flurfreien Fördermittel sind an der Hallendecke befestigt bzw. verfahren auf Schienen oder ähnlichen Führungselementen, die an

der Hallendecke befestigt sind. Flurgebundene Fördermittel verfahren auf dem Boden oder nutzen Einrichtungen, die im Boden eingelassen sind. Bei den aufgeständerten Fördermitteln erfolgt der Transport von PKWs in einer genau definierten Höhe über dem Boden mit Führungselementen /JÜN99/.

In vollautomatischen Parksystemen mit radialer Anordnung der Stellplätze werden ausschließlich ortsfeste und aufgeständerte Fördermittel eingesetzt. Zur Ein- und Auslagerung müssen die PKWs vertikal transportiert und gedreht werden. Die Drehbewegung verläuft abhängig oder unabhängig von dem vertikalen Transport der PKWs. In der **Abb. 2.16** sind die eingesetzten Fördermittel in vollautomatischen Parksystemen mit radialer Anordnung der Stellplätze systematisch unterteilt.

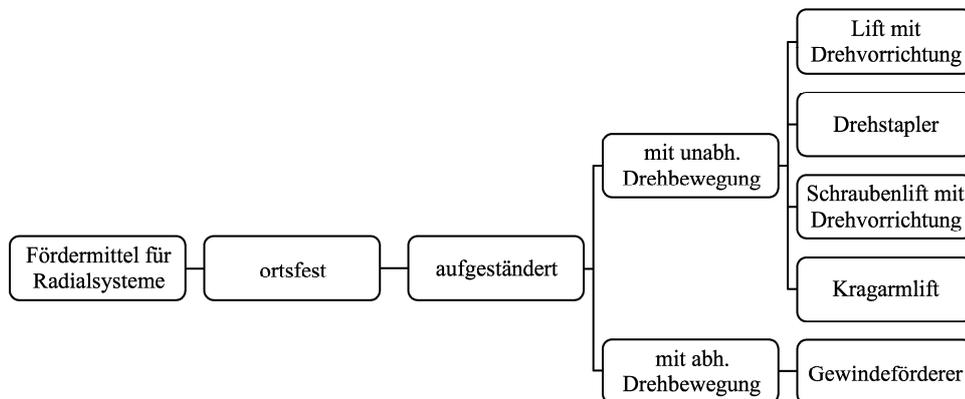


Abb. 2.16 Systematische Gliederung der Fördermittel in automatischen Parksystemen mit radialer Anordnung der Stellplätze. In Anlehnung an /SAL00a/

2.1.4 Sekundärfördertechnik in automatischen Parksystemen

Die Hauptaufgabe der Sekundärfördertechnik ist der Transport von PKWs zwischen den Nutzerschnittstellen/Lagermitteln und dem Primärfördermittel. Dabei werden die Transportsysteme unterteilt in Sekundärfördertechniken, die einen Transport der PKWs mit oder ohne Ladungsträger ermöglichen. Als Ladungsträger für den Transport von PKWs innerhalb von vollautomatischen Parksystemen werden i.d.R. Paletten eingesetzt, die breiter und länger sind, als die ein- bzw. auszulagernden PKWs. Zur translatorischen Bewegung der PKWs mit den Paletten befinden sich Rollen oder Gleitkufen unter den Paletten. Als Antrieb werden Zug- oder Schubvorrichtungen verwendet. Alternativ dazu gibt es auch Paletten, die keine Bewegungselemente besitzen und durch Stetigförderer, Kanalfahrzeuge oder Teleskoparme transportiert werden.

Bei den Sekundärfördersystemen ohne Ladungsträger werden die PKWs zum horizontalen Transport angehoben oder von den Fördermitteln ohne anzuheben gezogen bzw. geschoben. Das Anheben oder Ziehen der PKWs erfolgt mit Dornen oder Keilen, die vor und hinter je-

dem PKW-Reifen durch ein Fördermittel positioniert werden. Zum Anheben werden ein oder beide Dorne bzw. Keile an jedem PKW-Reifen translatorisch (s. **Abb. 2.17**) oder durch Schwenken aufeinander zu bewegt, wodurch die Reifen eingeklemmt und angehoben werden. Alternativ dazu gibt es Systeme, bei denen die PKWs mit Hilfe eines Kamms, der unter die PKW-Räder durchgeführt wird, angehoben werden (s. **Abb. 2.18**).

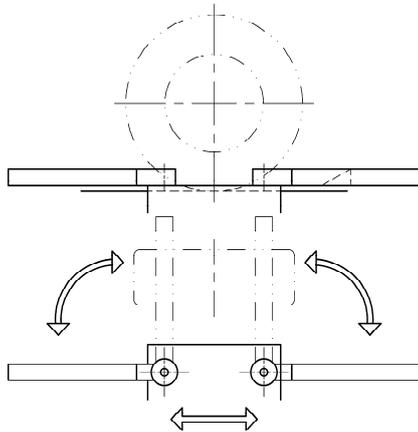


Abb. 2.17 Mechanismus zum Anheben eines PKW-Reifens mit rotatorisch verfahrenen Dornen

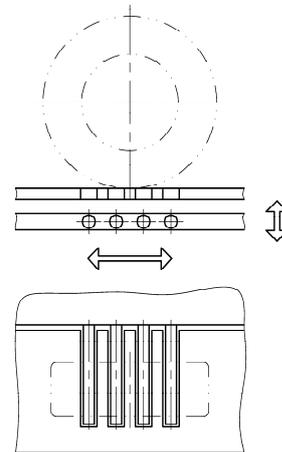


Abb. 2.18 Mechanismus zum Anheben eines PKW mit einem Kamm

2.2 Automatisierte Krane

In der VDI-Richtlinie 3653 sind automatisierte Krane als flurfreie Fördermittel definiert, die Lasten heben und in einer oder mehrere Richtungen teil- oder vollautomatisch gesteuert werden /VDI98/. Die unterschiedlichen Bauformen von Kranen können im Wesentlichen unterteilt werden in linear verfahrbare Krane mit quaderförmigen Arbeitsraum oder Drehkrane mit zylindrischen Arbeitsraum /TEN07/. Das Hauptanwendungsgebiet von automatisierten Kranen ist der Transport von Stückgütern auf wiederkehrenden Bahnen, wie z.B. der Transport von Containern bei der Be- und Entladung eines Schiffs oder der Transport von Stahl-Coils in einem Bodenblocklager /ZIE94/. Ein weiteres Anwendungsgebiet von automatisierten Kranen ist der Transport von Lasten in gefährlichen Umgebungen. Darüber hinaus werden teilautomatisierte Krane eingesetzt, um Kranbediener bei komplexen Bedienvorgängen zu unterstützen.

Ein neues Anwendungsgebiet für automatisierte Krane ist der Einsatz in Hochregallagern, wie es z.B. in der Patentschrift /PAT99/ oder den Artikeln /LEH99/ und /SEE07/ beschrieben wird. Gegenüber konventionellen Fördermitteln, wie z.B. RBGs, ermöglicht der Einsatz von automatisierten Kranen eine deutliche Reduzierung von Investitionskosten, aufgrund des einfacheren mechanischen Aufbaus. Des Weiteren sind Krane infolge ihrer flurfreien Arbeits-

weise wesentlich flexibler hinsichtlich Änderung im Lageraufbau und benötigen keine besondere Bodenbeschaffenheit /NN02/.

Ein Nachteil von automatisierten Kranen in Hochregallagern ist die geringe Leistungsfähigkeit im Vergleich zu konventionellen Fördermitteln. Eine Ursache für die geringere Leistungsfähigkeit ist das Lastpendeln. Zur Verringerung des Lastpendelns sind unterschiedlichste Methoden zur Führung der Last bekannt.

2.2.1 Systematik der Lastführungen

Eine Störgröße, durch die eine Kranautomatisierung wesentlich erschwert wird, ist das Lastpendeln. Das Lastpendeln wird vor allem durch Beschleunigungen und Verzögerungen des Krans hervorgerufen /WAG99/. Darüber hinaus kann auch die Einwirkung von äußeren Kräften, wie z.B. Wind oder eine Lastaufnahme außerhalb des Schwerpunkts ein Lastpendeln verursachen oder zusätzlich verstärken /VDI98/. Zur Reduzierung des Lastpendelns von automatischen Kranen sind bereits zahlreiche Lastführungssysteme bekannt. Die bekannten Lastführungssysteme können eingeteilt werden in Systeme, bei denen das Lastpendeln mit Hilfe von mechanisch wirkenden Lastführungen verringert wird, und Systeme, bei denen elektronische wirkende Lastführungen zur Dämpfung eingesetzt werden. Auch eine Kombination beider Klassen von Lastführungssystemen ist möglich.

Die mechanisch wirkenden Lastführungssysteme können weiter unterteilt werden in Systeme mit einem starren mechanischen Aufbau und Systeme mit einem flexiblen mechanischen Aufbau. Bei den elektronisch wirkenden Lastführungssystemen erfolgt die Reduzierung des Lastpendelns durch eine Steuerung und/oder eine Regelung. In der **Abb. 2.19** ist eine Klassifizierung der vorhandenen Lastführungssysteme dargestellt.

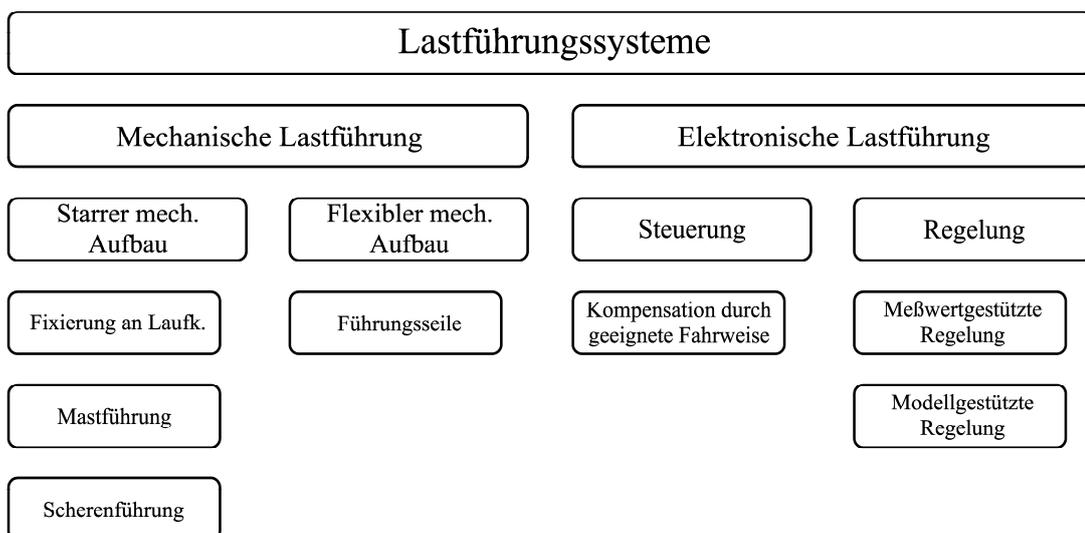


Abb. 2.19 Klassifizierung der Lastführungssysteme (in Anlehnung an /KLE96/)

2.2.2 Aufbau und Funktion von mechanischen Lastpendeldämpfungen

Die einfachste Möglichkeit einer mechanischen Lastführung ist die Fixierung der Last in der obersten Hubstellung (s. **Abb. 2.20**). Zur Vermeidung eines Lastpendelns muss bei dieser Lastführung die Last erst in die oberste Hubstellung gehoben werden, bevor der Kran in horizontaler Richtung fahren kann /NN86/. Aufgrund dieses orthogonalen Bewegungsablaufs können nur geringer Förderleistungen mit dieser Lastführung erreicht werden. Höhere Leistungen können bei Lastführungen mit einem starren mechanischen Aufbau nur erzielt werden, wenn die Last in jeder Hubhöhe von einem starren Element geführt wird. Systeme, die eine starre mechanische Lastführung in jeder Hubhöhe ermöglichen, verwenden teleskopierbare Masten oder Scheren (s. **Abb. 2.21** und **Abb. 2.22**) /HEI91/.

Da bei dem Verfahren eines Krans hohe Momente auf die starren mechanischen Lastführungen wirken, insbesondere bei niedrigeren Lastpositionen, muss der mechanische Aufbau entsprechend groß dimensioniert werden, was sich negativ auf die Kosten auswirkt. Eine Reduzierung des konstruktiven Aufwands kann durch den Einsatz von Lastführungen mit einem flexiblem mechanischen Aufbau erreicht werden. Bei diesen Systemen besteht die Lastführung aus trapezförmig angeordneten Seilen. Dabei werden entweder die Tragseile trapezförmig angeordnet (s. **Abb. 2.23**), oder es werden zusätzliche Führungsseile eingesetzt. Weitere Varianten bei diesen Lastführungen verwenden zusätzliche Antriebe oder Dämpfungssysteme, um die Seilspannung zu beeinflussen und die Lastführung zu verbessern /FRA73/.

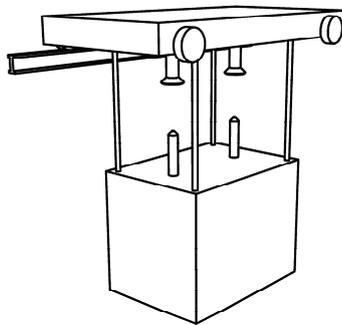


Abb. 2.20 Fixierung der Last in oberster Hubstellung /KÜN07/

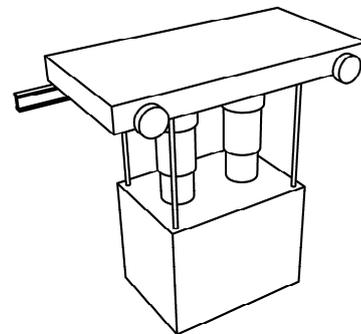


Abb. 2.21 Lastführung durch teleskopierbare Masten /KÜN07/

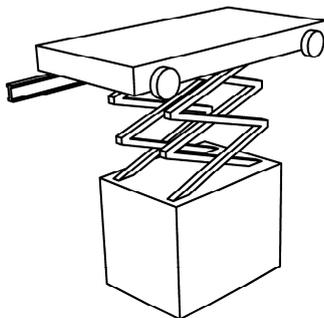


Abb. 2.22 Lastführung durch Scheren /KÜN07/

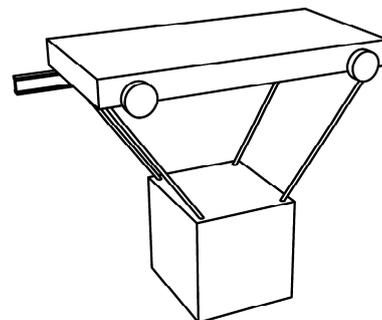


Abb. 2.23 Lastführung durch eine trapezförmige Anordnung der Tragseile /KÜN07/

2.2.3 Aufbau und Funktion von elektronischen Lastpendeldämpfungen

Die elektronischen Lastführungen erreichen eine Lastpendeldämpfung durch Fahrbefehle, die steuerungs- oder regelungstechnisch an die Lastbewegung angepasst sind. Im Vergleich zu den mechanisch wirkenden Lastführungen besitzen die elektronischen Lastpendeldämpfungen den Vorteil, dass der Aufbau und die Implementierung in vorhandene oder neue Kransysteme wesentlich einfacher möglich ist. Insbesondere bei den elektronischen Lastführungen mit einer Kompensation des Lastpendelns durch eine Steuerung, ohne die Rückführung des Pendelwinkels, sind kaum Änderungen am Kransystem notwendig.

Die Funktionsweise der Lastführung durch eine Steuerung ohne die Rückführung bzw. Messung des Pendelwinkels beruht darauf, dass die Fahrbefehle an die Periodendauer der Lastschwingung angepasst werden. Im einfachsten Fall bedeutet dies, dass die Beschleunigung und die Verzögerung des Krans bzw. der Laufkatze ebenso lange dauern, wie die Periodendauer der Lastschwingung. Neben dem beschriebenen einfachen Beschleunigungsverlauf sind zahlreiche weitere Steuerungsstrategien bekannt, die ein zeitoptimales und pendelfreies Verfahren von Kranen ermöglichen (vgl. Kap. 4).

Die Funktionsweise von regelungstechnischen Lastführungen beruht darauf, dass der Pendelwinkel während des Verfahrens gemessen und über einen P-Regler, PD-Regler oder Fuzzy-Reglermodul an die Regelung zurückgeführt wird /SAW01/. Ein Nachteil dieser Regelungen ist der messtechnische Aufwand zur Erfassung des Pendelwinkels. Folgende Verfahren konnten sich bisher zur Messung des Pendelwinkels etablieren:

- Messseil mit Pendelwinkelgeber. Als Sensoren werden dabei Winkelcodierer oder Hall-Effekt-Sensoren eingesetzt (s. **Abb. 2.24** und **Abb. 2.25**)
- Pendelwinkelsensorik am Tragseil (s. **Abb. 2.26**)
- Optische Pendelwinkelerfassung (s. **Abb. 2.27**)

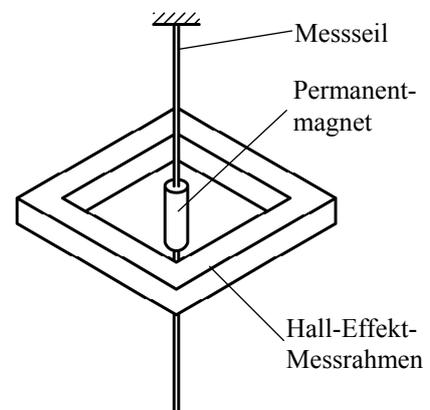
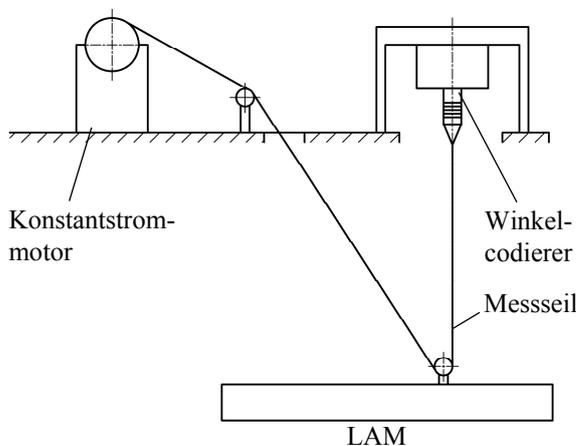


Abb. 2.24 Pendelwinkelgeber über Messseil **Abb. 2.25** Hall-Effekt-Sensor /SIE99/
/THI96/

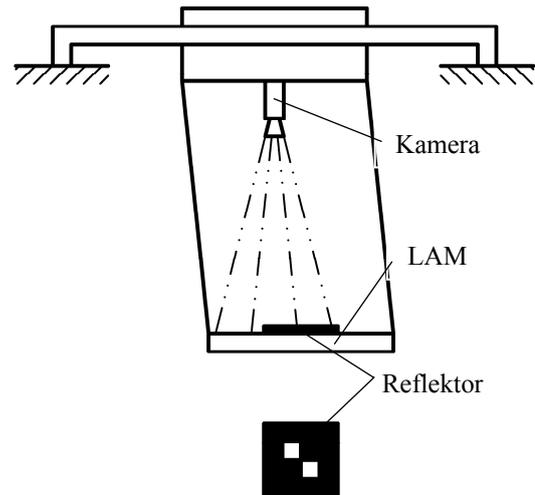
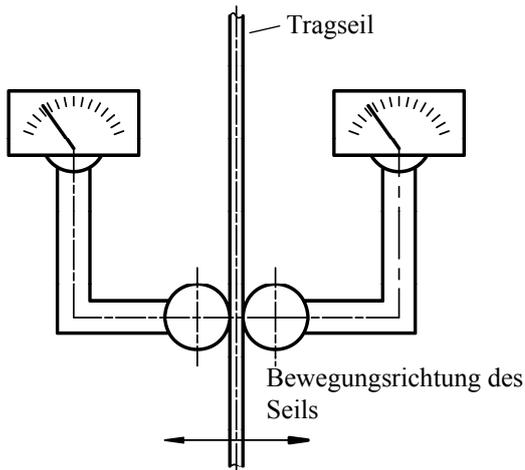


Abb. 2.26 Pendelwinkelgeber am Tragseil /HEP02/ **Abb. 2.27** Optische Pendelwinkelerfassung/LEH02/

Eine weitere Möglichkeit zur Messung des Pendelwinkels entsteht durch den Einsatz von Beschleunigungs- oder Drehratensensoren, die direkt am LAM angebracht sind. Neben den Regelungssystemen mit einer Rückführung des Pendelwinkels sind auch Regelungssysteme bekannt, die mit Hilfe von Beobachtersystemen arbeiten /SCH80/. Bei diesen Systemen wird der Pendelwinkel mit Hilfe eines mathematischen Modells berechnet und an den Regler zurückgeführt.

Da die elektronischen Lastführungen mit messwertgestützter Regelung auch Pendelauslenkungen infolge von äußeren Einflüssen, wie z.B. Wind oder Schräglauf der Krankatze, berücksichtigen können, ermöglichen diese Steuerungsstrategien eine bessere Pendeldämpfung als die Lastführungen mit einer Steuerung ohne die Rückführung des Pendelwinkels. Nach der VDI-Richtlinie 4468 wird ein Restpendeln von 3 mm bei automatisierten Kranen mit einer Rückführung des Pendelwinkels und 10 mm bei dem Einsatz von Steuerungsstrategien gefordert /VDI04/.

3 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise

3.1 Problemstellung

Der Einsatz von automatisierten Parksystemen bietet eine Vielzahl von Vorteilen. Einer der entscheidendsten Vorteile im Vergleich zu konventionellen Parksystemen ist der geringe Flächen- und Volumenbedarf. Darüber hinaus können automatisierte Parksysteme auf Grundstücksflächen errichtet werden, auf denen der Bau von konventionellen Parksystemen nicht möglich ist. Diese Vorteile von automatisierten Parksystemen ermöglichen den Architekten und Städtebauern neue Gestaltungsmöglichkeiten, bei gleichzeitiger Lösung des Parkraumproblems. Insbesondere in den nationalen und internationalen Großstädten besteht bereits jetzt ein Mangel an Parkplätzen. Automatisierte Parksysteme können dazu beitragen, diesen Mangel zu beseitigen.

Trotz der beschriebenen Vorteile werden automatisierte Parksysteme in Neubauprojekten kaum oder gar nicht berücksichtigt. Ein entscheidender Grund hierfür sind die hohen Kosten im Vergleich zu konventionellen Parksystemen. Ein Kostenfaktor, der maßgeblich für den Unterschied zwischen den Investitionskosten bei konventionellen und automatisierten Parksystemen verantwortlich ist, sind die Kosten für die Primärfördertechnik. Obwohl es sich bei den verwendeten Primärfördermitteln oftmals um Systeme handelt, deren Funktionsprinzipien bereits aus intralogistischen Anlagen mit Europaletten bekannt sind, ist der Einsatz von standardisierten Primärfördermitteln aus einer Serienproduktion nicht möglich, da die Massen und Abmessungen der PKWs im Vergleich zu Gütern auf Europaletten wesentlich größer sind. Daraus resultiert, dass Primärfördermittel für automatisierte Parksysteme i.d.R. Sonderanfertigungen sind oder komplett neu entwickelt werden, wodurch ein hoher Kostenaufwand entsteht.

Die genannte Problematik zeigt, dass ein erheblicher Bedarf an kostengünstigen Lösungen für Primärfördermittel in automatisierten Parksystemen besteht. Ein Primärfördermittel mit einem besonders hohen Kosteneinsparungspotential ist der Kran. Das Kosteneinsparungspotential entsteht dabei vor allem durch den einfachen mechanischen Aufbau, im Vergleich zu anderen Primärfördermitteln. Ein Nachteil dieses Systems ist das Lastpendeln. Bisher eingesetzte Systeme zur Reduzierung des Lastpendelns verwenden überwiegend elektronische Regelungen, die eine aufwendige Messtechnik zur Erfassung des Pendelwinkels und leistungsstarke Antriebe benötigen. Des Weiteren werden durch die eingesetzten Regelungen die Spielzeiten negativ beeinflusst.

Aufgrund der beschriebenen Nachteile sind Steuerungen, die ohne eine Rückführung des Pendelwinkels ein Lastpendelfreies Erreichen der Zielposition ermöglichen eine sinnvolle Alternative zu den bisher eingesetzten Regelungen. Im Unterschied zu den Regelungen werden bei den Steuerungen verschiedene Strategien mit unterschiedlichen Verfahrbeschleunigungen und –verzögerungen für festgelegte Positionen und Tragseillängen vor der Fahrt berechnet und in einer Datenbank gespeichert. Die Berechnung der Steuerungsstrategien erfolgt mit unterschiedlichen Algorithmen. Diese Algorithmen sind vorwiegend für den Transport von Containern in Häfen entwickelt worden. Lagersysteme unterscheiden sich von diesem Anwendungsfall vor allem durch die Verfahrgeschwindigkeiten und die Verfahrwege. In wie weit sich die bekannten Steuerungsstrategien für den Einsatz in automatisierten Parksystemen eignen, ist bisher nicht bekannt.

Aus den genannten Gründen ist die Untersuchung von Steuerungsstrategien für die Anwendung von Krananlagen in automatisierten Parksystemen von entscheidendem Interesse. Die Erforschung der notwendigen Randbedingung für den Einsatz von Steuerungsstrategien in automatisierten Parksystemen kann dazu beitragen, dass Krananlagen vermehrt eingesetzt werden. Von besonderem Interesse bei den Untersuchungen sind die Spielzeiten, die mit den Steuerungsstrategien erreicht werden können. Darüber hinaus ist bisher nicht bekannt, welche Auslenkungen mit Steuerungsstrategien erzielt werden können, wenn kinematische und/oder geometrische Toleranzen in dem Kransystem vorhanden sind. Da davon ausgegangen werden muss, dass in realen Systemen immer Abweichungen von dem theoretischen Idealzustand vorhanden sind, ist dieser Punkt entscheidend für die Bewertung der Steuerungsstrategien hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in realen Systemen.

3.2 Zielsetzung

Ausgehend von der aufgezeigten Problemstellung ist die Zielsetzung im Rahmen dieser Arbeit eine Kostenreduktion von automatisierten Parksystemen durch den Einsatz von Krananlagen, die automatisiert mit Hilfe von Steuerungsstrategien in Parksystemen eingesetzt werden. Zu diesem Zweck werden zunächst unterschiedliche Steuerungsstrategien untersucht, um herauszufinden, welche Strategien die Anforderungen an den Einsatz von Krananlagen in automatisierten Parksystemen am besten erfüllen. Da bisher nicht bekannt ist, wie sich kinematische und geometrische Toleranzen auf die Funktionsfähigkeit der Steuerungsstrategien auswirken, werden in den Untersuchungen die Auslenkungen ermittelt, die während und nach der Positionierung bei der Berücksichtigung von Toleranzen auftreten. Diese Ergebnisse werden schließlich für die Festlegung der Breite der Verfahrpassage und die Gestaltung der Lagerplätze benötigt. Darüber hinaus wird ausgehend von den durchgeführten Untersuchungen eine neue mechanisch wirkende Dämpfungsvorrichtung entwickelt, die eine schnelle Eliminierung

des zu erwartenden Lastpendelns nach der Positionierung ermöglicht und somit dazu beiträgt, die Leistungsfähigkeit von automatisierten Krananlagen zu erhöhen.

3.3 Vorgehensweise

Die Untersuchung der Steuerungsstrategien wird auf der Grundlage von Simulationen und mit Hilfe von Modellexperimenten durchgeführt. In einem ersten Schritt vor der Durchführung der Simulationsuntersuchung werden die Algorithmen zur Berechnung der Steuerungsstrategien hergeleitet. Im Anschluss daran werden mathematische Modelle für Krananlagen entwickelt. Diese mathematischen Modelle berücksichtigen im Gegensatz zu den bekannten Modellen eine veränderliche Tragseillänge bei unterschiedlichen Tragseilanordnungen. Zur Simulation werden die mathematischen Modelle schließlich in eine Simulationssoftware implementiert.

In der Simulation werden die unterschiedlichen Steuerungsstrategien durch eine Variation von Parametern untersucht. Zur Bewertung der einzelnen Steuerungsstrategien ist neben den Spielzeiten auch die Auslenkung aufgrund von Toleranzen innerhalb des Kransystems ein entscheidender Bewertungsfaktor. Zur Validierung der Simulationsmodelle und –ergebnisse wird schließlich ein maßstäbliches Kranmodell konstruiert und aufgebaut. Neben der Validierung der Simulationsmodelle ermöglicht das Kranmodell eine Untersuchung des Einflusses von geometrischen Toleranzen, die in der Simulation nicht nachgebildet werden können.

Die Ergebnisse der Simulationen und der Modellexperimente werden schließlich für die Entwicklung einer neuen mechanisch wirkenden Dämpfungsvorrichtung, zur Reduzierung der Lastpendelns nach der Positionierung, eingesetzt. Bei der Entwicklung der Dämpfungsvorrichtung werden mit Hilfe von konstruktionssystematischen Methoden verschiedene Konzepte entwickelt und bewertet.

4 Steuerungsstrategien zur Lastpendeldämpfung

Das Lastpendeln von Kranen hat negative Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit und die Sicherheit des Kranbetriebes. Die wirtschaftlich negativen Auswirkungen entstehen durch die langen Spielzeiten. Darüber hinaus wird eine Automatisierung durch das Lastpendeln erschwert, weshalb die teurere manuelle Bedienung bevorzugt wird. Durch ein unkontrolliertes Lastpendeln besteht darüber hinaus die Gefahr, dass Menschen und Gegenstände zu Schaden kommen. Aufgrund dieser Nachteile wurde bereits eine Vielzahl an wissenschaftlichen Arbeiten zur Lastpendeldämpfung durchgeführt und veröffentlicht. Alleine die Anzahl der weltweiten veröffentlichten Fachbeiträge zu diesem Thema zeigt die Relevanz dieses Problems.

Die bekannten elektronischen Lastpendeldämpfungen wurden vorwiegend für Container- oder Greiferkrane entwickelt. Bei dem Einsatz von Kranen in Parksystemen ergeben sich gegenüber Container- oder Greiferkranen andere Einsatzbedingungen. Neben den kürzeren Verfahrenswegen und den höheren Geschwindigkeiten ist mit äußeren Kräften, wie z.B. durch Wind verursacht, bei Kranen in Parksystemen nicht zu rechnen. Darüber hinaus befindet sich der Schwerpunkt von PKWs im Vergleich zu beladenen Containern immer in einem vorhersehbaren Bereich. Aufgrund dieser Eigenschaften ist der Einsatz von Lastpendeldämpfungen ohne die Messung des Lastpendelns in automatischen Parksystemen grundsätzlich möglich.

Bei den elektronischen Lastpendeldämpfungen ohne die Messung des Lastpendelns wird die Beschleunigung und Verzögerung des Krans vor dem Verfahren mit Steuerungsstrategien berechnet, die ein lastpendelfreies Erreichen der Zielposition ermöglichen. Dabei kann die Berechnung der Steuerungsstrategie mit unterschiedlichen Algorithmen erfolgen. Die verschiedenen Steuerungsstrategien können anhand der folgenden Charakteristiken unterteilt werden:

- Steuergröße (Geschwindigkeit oder Motormoment)
- Zielgröße (Weg oder Geschwindigkeit)
- Tragseillänge während des Verfahrens (konstant oder variabel)
- Freiheitsgrad der Lastschwingung

Im Folgenden werden nur Steuerungsstrategien beschrieben, die für den Einsatz von Kranen in Parksystemen relevant sind. Dem entsprechend werden Steuerungsstrategien mit dem Motormoment als Steuerungsgröße und mit mehr als einem schwingungsfähigen Freiheitsgrad nicht berücksichtigt. Des Weiteren werden nur Steuerungsstrategien beschrieben, die idealisierte rechteckige Beschleunigungsverläufe zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit verwenden. Die Zulässigkeit von idealisierten Antriebscharakteristiken wurde bereits von /AUE86/

nachgewiesen. Als Zielgröße muss der Weg und die Geschwindigkeit durch die Steuerungsstrategie berücksichtigt werden.

4.1 Steuerungsstrategien für konstante Trageisllängen

Steuerungsstrategien enthalten Steuergrößenverläufe, mit denen Positionierungsvorgänge pendelfrei erreicht werden können. Die Berechnung der Steuerungsstrategien erfolgt dazu ausgehend von einem mathematischen Modell des Kransystems mit Berechnungsalgorithmen. Da bei der Anwendung von Steuerungsstrategien i.d.R. keine Rückkopplung des Pendelwinkels oder anderer Messwerte während der Positionierung erfolgt, werden die Steuerungsstrategien für unterschiedliche Parameter im Vorfeld berechnet und in einer Datenbank gespeichert. Der wichtigste Parameter, der vor der Positionierung bestimmt werden muss, ist die Trageisllänge.

Zum pendelfreien Erreichen einer Zielposition wurden in der Vergangenheit zahlreiche Berechnungsalgorithmen entwickelt. Dabei wird zwischen Steuerungsstrategien mit einem globalen und einem lokalen Lastpendelausgleich unterschieden. Bei einem globalen Lastpendelausgleich wird eine Lastpendeldämpfung bereits nach der Beschleunigung der Laufkatze erreicht, so dass die Last während des Verfahrens mit konstanter Geschwindigkeit pendelfrei unter der Laufkatze hängt (s. **Abb. 4.1**). Dem gegenüber ist die Last bei einem lokalen Lastpendelausgleich erst am Ende des Positionierungsvorganges pendelfrei (s. **Abb. 4.2**). Neben der Eliminierung des Pendelwinkels können auch Nebenbedingungen, wie z.B. eine Begrenzung der maximalen Katzgeschwindigkeit, bei den Berechnungsalgorithmen berücksichtigt werden. Da bei realen Bediensystemen eine vorgegebene Verfahrensgeschwindigkeit weder unterschritten noch überschritten werden soll, werden im Folgenden nur Steuerungsstrategien hergeleitet, bei denen eine Begrenzung der maximalen Geschwindigkeit der Krankatze berücksichtigt wird.

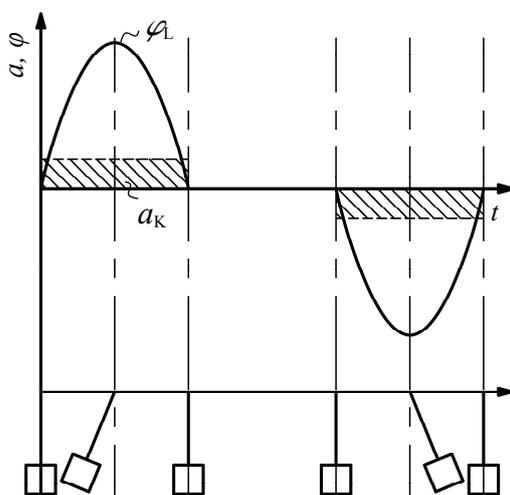


Abb. 4.1 Globaler Lastpendelausgleich

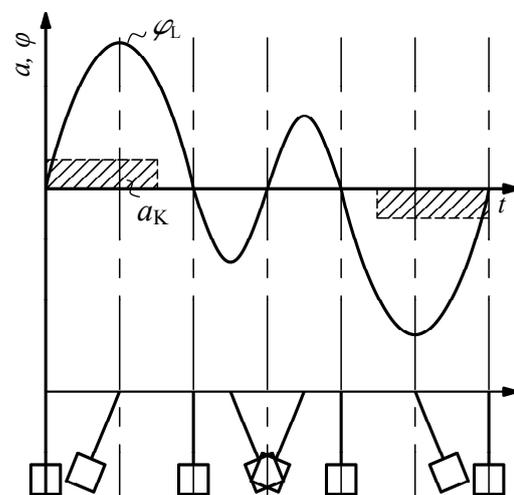


Abb. 4.2 Lokaler Lastpendelausgleich

4.1.1 Globaler Lastpendelausgleich

Wie bereits in Kap. 2.2.3 erläutert wurde, kann ein globaler Lastpendelausgleich im einfachsten Fall erreicht werden, wenn die Beschleunigungsdauer t_a als ganzzahliges Vielfaches der Periodendauer gewählt wird /MEY71/, /PAT86/. In diesem Fall befindet sich die Last nach dem Erreichen der Zielgeschwindigkeit direkt unterhalb der Laufkatze (s. **Abb. 4.1**). Im Folgenden wird diese Steuerungsstrategie als *Strategie 1* bezeichnet. Unter der Annahme, dass die Periodendauer des Lastpendelns mit der Periodendauer eines mathematischen Pendels übereinstimmt, kann die Beschleunigungsdauer bei der *Strategie 1* nach Gl. (4.1) bestimmt werden.

$$t_a = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (4.1)$$

Zum Einhalten einer vorgegebenen Verfahrgeschwindigkeit muss die Höhe der Beschleunigung mit der Gl. (4.2) berechnet werden. Dabei können unter Umständen sehr hohe Beschleunigungen und Pendelauslenkungen entstehen. Eine Reduzierung der Pendelauslenkungen kann erreicht werden, wenn die Dauer der Beschleunigung erhöht wird.

$$a_K = \frac{v_K}{t_a} \quad (4.2)$$

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Verfahrgeschwindigkeit ist der Einsatz eines zweiten Beschleunigungsintervalls. Die Länge der einzelnen Beschleunigungsintervalle entspricht dabei wieder der Periodendauer. Der zeitliche Abstand zwischen den beiden Beschleunigungsintervallen kann beliebig festgelegt werden. Diese Variante der *Strategie 1* ist in **Abb. 4.3** dargestellt und wird im Folgenden als *Strategie 2* bezeichnet. Ein Vorteil der *Strategie 2* ist die stufenweise Erhöhung der Verfahrgeschwindigkeit durch das Hinzufügen von weiteren Schaltintervallen. Dem gegenüber sind die langen Positionierungszeiten ein Nachteil dieser Steuerungsstrategie.

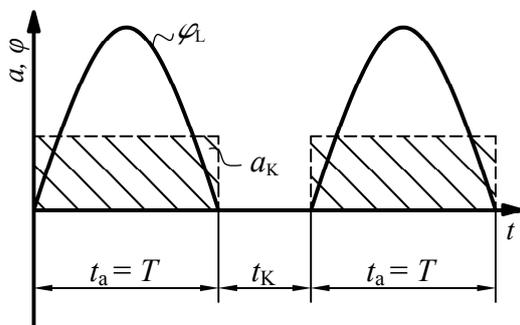
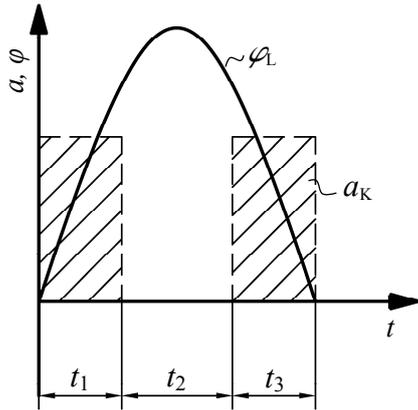


Abb. 4.3 Funktionsprinzip der Strategie 2 zum Beschleunigen auf die vorgegebene Maximalgeschwindigkeit

Eine Steuerungsstrategie, bei der ebenfalls die Zielgeschwindigkeit durch eine zweitstufige Beschleunigung erreicht wird, ist in den Patentschriften /PAT86/ und /PAT89/ dargestellt (**Abb. 4.4**). Bei den Berechnungsverfahren in diesen Patentschriften wird die Höhe der Be-

schleunigung vor der Berechnung als konstanter Wert festgelegt. Die Berechnung der Beschleunigungsdauer erfolgt ohne Berücksichtigung der Periodendauer und nur in Abhängigkeit der Verfahrensgeschwindigkeit (s. 4.3). Der Abstand zwischen den zwei Beschleunigungsintervallen wird schließlich ausgehend von der Bewegungsgleichung und dem vorausgegangenen Beschleunigungsintervall so berechnet (s. 4.4), dass das Ende des zweiten Beschleunigungsintervalls mit dem Ende der Pendelschwingung, die aufgrund des ersten Beschleunigungsintervall entsteht, zusammen fällt. Diese Methode der Lastpendeldämpfung wird nachstehend als *Strategie 3* bezeichnet.



$$t_{1,3} = \frac{v_{\max}/2}{a_K} \quad (4.3)$$

$$t_2 = \frac{T}{\pi} \arctan\left[\frac{1}{\tan(\pi t_1/T)}\right] \quad (4.4)$$

Abb. 4.4 Funktionsprinzip und Berechnungsvorschrift der Strategie 3 zum Beschleunigen auf die maximale Verfahrensgeschwindigkeit /PAT89/

Zur Lastpendeldämpfung und gleichzeitigen Reduzierung der Positionierungszeiten sind Steuerungsstrategien bekannt, bei denen die Beschleunigungsintervalle und die Abstände zwischen den Intervallen durch Optimierungsalgorithmen minimiert werden. Als Grundlage der Optimierungsberechnungen wird dabei i.d.R. das Maximumprinzip von *Pontrjagin* /PON67/ angewendet. Berechnungsalgorithmen für zeitoptimierte Steuerungsstrategien und einen globalen Lastpendelausgleich werden zum Beispiel von /AUE85/ oder /BUC99/ beschrieben.

Für das pendelfreie und zeitoptimale Erreichen der maximalen Verfahrensgeschwindigkeit werden mindesten drei Schaltintervalle benötigt (s. **Abb. 4.5**). Dabei ist ein Beschleunigungsintervall negativ. Durch dieses negative Beschleunigungsintervall wird die Last, die aufgrund des ersten Beschleunigungsintervalls ausgelenkt wurde, wieder von der Laufkatze eingeholt. Ab Geschwindigkeit von 188 m/min (bei einer konstanten Trageillänge von 10 m) müssen weitere Beschleunigungsintervalle hinzugefügt werden. Die Berechnung der Beschleunigungsintervalle erfolgt durch die Gl. 4.5 bis Gl. 4.7. Nachstehend wird die in **Abb. 4.5** dargestellte Steuerungsstrategie als *Strategie 4* bezeichnet.

$$\Delta t_1 = \Delta t_3 = \frac{1}{2\omega} - \arcsin\left[\frac{1}{2} \sin\left(\frac{\tau}{2\omega}\right)\right] \quad (4.5)$$

$$\Delta t_2 = 2 \arcsin\left[\frac{1}{2} \sin\left(\frac{\tau}{2\omega}\right)\right] \quad (4.6)$$

Die Hilfsgröße τ wird mit der Gl. (4.7) berechnet.

$$\frac{v_{\max} \omega}{a_K} = \tau - 4 \arcsin\left[\frac{1}{2} \sin\left(\frac{\tau}{2}\right)\right] \quad (4.7)$$

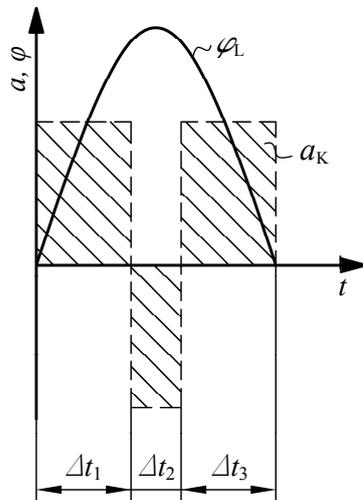


Abb. 4.5

Funktionsprinzip und Berechnungsvorschrift der Strategie 4 zum Beschleunigen auf die maximale Verfahrensgeschwindigkeit /BUC99/

4.1.2 Lokaler Lastpendelausgleich

Bei den Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich werden die Schaltzeitpunkte der Beschleunigungs- und Verzögerungsintervalle ausgehend von der Bewegungsgleichung des Lastpendels so berechnet, dass am Ende der Verfahrensbewegung das Lastpendeln ausgeglichen ist. Der Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgang besteht dabei aus einem oder mehreren Beschleunigungs- und Verzögerungsintervallen, die symmetrisch zur halben Fahrzeit angeordnet sind.

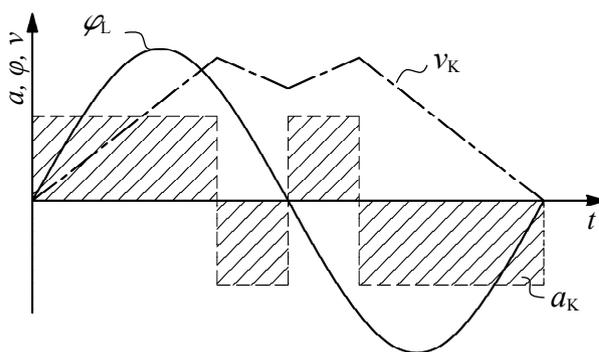


Abb. 4.6 Anordnung der Beschleunigungs- und Verzögerungsintervalle bei einer zeitoptimalen Steuerungsstrategie mit vier Schaltzeitpunkten

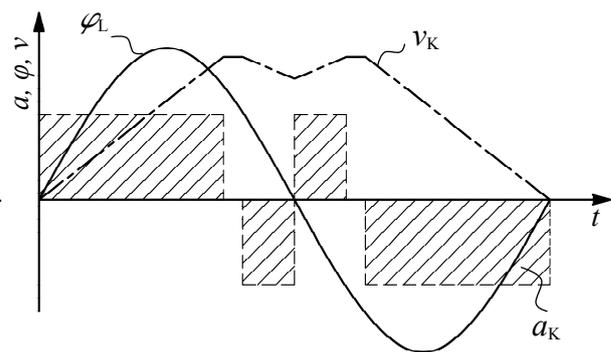


Abb. 4.7 Anordnung der Beschleunigungs- und Verzögerungsintervalle bei einer zeitoptimalen Steuerungsstrategie mit sechs Schaltzeitpunkten

Durch die Anwendung des Maximumprinzips nach Pontrjagin können die Schaltzeitpunkte optimiert werden, so dass die Fahrzeit zum Erreichen einer Zielposition minimiert wird /PON69/. Für eine zeitoptimale Positionierung ohne Berücksichtigung einer Geschwindig-

keitsbegrenzung besteht der gesamte Positionierungsvorgang aus zwei Beschleunigungsintervallen und zwei Verzögerungsintervallen (s. **Abb. 4.6**). Bei der Berücksichtigung einer Geschwindigkeitsbegrenzung müssen Intervalle mit konstanter Verfahrensgeschwindigkeit in den Positionierungsvorgang eingefügt werden. Daraus folgt, dass eine zeitoptimale Steuerungsstrategie mit einer Berücksichtigung der Geschwindigkeitsbegrenzung mindestens sechs Schaltzeitpunkte besitzt (s. **Abb. 4.7**) /PAL96/.

Die Anzahl der Schaltzeitpunkte bei einer zeitoptimalen Steuerungsstrategie mit Geschwindigkeitsbegrenzung ist von der Länge der Verfahrestrecke abhängig. Mit zunehmender Anzahl der Schaltzeitpunkte steigt auch die maximale Verfahrestrecke, die mit der jeweiligen Steuerungsstrategie zeitoptimal erreicht werden kann. Bei Verfahrestrecken, die über den Gültigkeitsbereich einer Steuerungsstrategie hinaus gehen, sind die Steuerungsstrategien weiterhin funktionsfähig, aber nicht mehr zeitoptimal. Für den Einsatz in automatisierten Parksystemen eignen sich zeitoptimale Steuerungsstrategien mit acht und zehn Schaltzeitpunkten. Im Folgenden wird die Berechnung von Steuerungsstrategien mit acht und zehn Schaltzeitpunkten nach den Ausführungen von *Margono* vorgestellt. Eine ausführliche Herleitung der dargestellten Berechnungsalgorithmen kann den aufgelisteten Literaturquellen entnommen werden /MAR04/.

Die **Abb. 4.8** zeigt die Beschleunigungs- und Verzögerungsintervalle sowie die daraus resultierenden Geschwindigkeit- und Pendelwinkelverläufe für eine zeitoptimale Steuerungsstrategie mit acht Schaltzeitpunkten. Da die Schaltzeitpunkte bei Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich symmetrisch zur halben Verfahrzeit t_e angeordnet sind, wird $t_e/2$ ebenfalls als Schaltzeitpunkt deklariert. Im Folgenden wird die Steuerungsstrategie mit acht Schaltzeitpunkten als *Strategie 5* bezeichnet.

Ebenso wie bei *Strategie 4* befindet sich in dem Anlaufvorgang bei der *Strategie 5* ein Verzögerungsintervall, in dem die schwingende Last von der Laufkatze eingeholt wird. Die Berechnung der Beschleunigungsintervalle erfolgt durch das Lösen eines Gleichungssystems mit den Gl. 4.8 bis 4.15. Da die Lösung des Gleichungssystems sehr umfangreich und zeitaufwendig ist, wurde das Gleichungssystem für die Untersuchungen in dieser Arbeit numerisch gelöst. Die Höhe der Beschleunigung ist bei allen Beschleunigungsintervallen gleich, wobei sich die Vorzeichen bei den Verzögerungsintervallen umkehren.

$$t_1 = \frac{v_{\max}}{a_K} \quad (4.8)$$

$$0 = 2 \cos\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_1 \omega\right) - 2 \cos\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_2 \omega\right) + \cos\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_3 \omega\right) - \cos\left(\frac{t_e \omega}{2}\right) \quad (4.9)$$

$$\frac{x}{2 a_K} = \frac{t_e}{2} (2t_1 - 2t_2 + t_3) - t_1^2 + t_2^2 - \frac{t_3^2}{2} \quad (4.10)$$

$$t_3 = 2t_2 - t_1 \quad t_4 = \frac{t_e}{2} \quad t_5 = t_e - t_3 \quad t_6 = t_e - t_2 \quad t_7 = t_e - t_1 \quad (4.11) - (4.15)$$

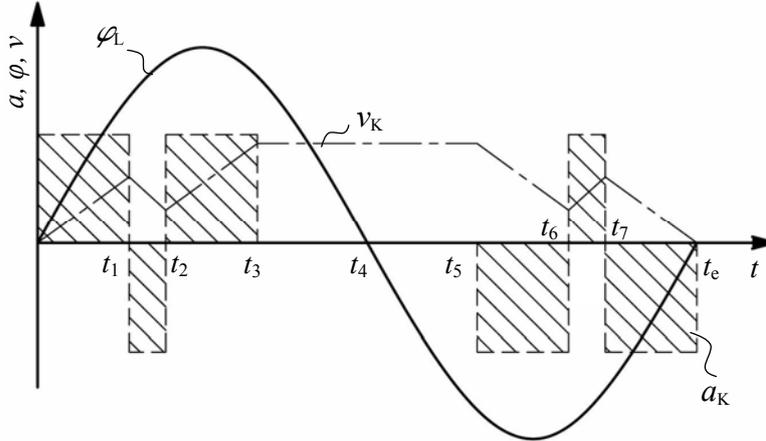


Abb. 4.8

Funktionsprinzip und Berechnungsvorschrift der Strategie 5

In der **Abb. 4.9** ist eine zeitoptimale Steuerungsstrategie mit zehn Schaltzeitpunkten dargestellt. Im Vergleich zu der zeitoptimalen Steuerungsstrategie mit acht Schaltzeitpunkten wird bei der dargestellten Steuerungsstrategie nach dem ersten Beschleunigungsintervall ein Zeitintervall mit konstanter Verfahrensgeschwindigkeit eingefügt. Durch dieses zusätzliche Zeitintervall soll eine Steigerung der zurückgelegten Verfahrstrecke ermöglicht werden. Die Berechnung der Zeitintervalle erfolgt in dieser Arbeit ebenfalls durch das numerische Lösen des Gleichungssystems mit den Gl. 4.16 bis 4.25. Nachfolgend wird diese Steuerungsstrategie mit zehn Schaltzeitpunkten als *Strategie 6* bezeichnet.

$$t_1 = \frac{v_{\max}}{a_K} \quad (4.16)$$

$$\frac{x}{a_K} = t_e (t_1 + t_2 - 2t_3 + t_4) - t_1^2 - t_2^2 + 2t_3^2 - t_4^2 \quad (4.17)$$

$$0 = \cos\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_4 \omega\right) - 2 \cos\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_3 \omega\right) + \cos\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_2 \omega\right) + \cos\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_1 \omega\right) - \cos\left(\frac{t_e \omega}{2}\right) \quad (4.18)$$

$$0 = \omega(t_4 - t_3) \left[\sin(t_4 \omega - t_2 \omega) \cos\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_4 \omega\right) + \cos(t_4 \omega - t_2 \omega) \sin\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_4 \omega\right) \right] + (t_3 - t_2) \sin\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_4 \omega\right) - \omega(t_4 - t_2) \left[\sin(t_4 \omega - t_3 \omega) \cos\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_4 \omega\right) + \cos(t_4 \omega - t_3 \omega) \sin\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_4 \omega\right) \right] \quad (4.19)$$

$$\cos\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_4 \omega\right) + \cos(t_4 \omega - t_3 \omega) \sin\left(\frac{t_e \omega}{2} - t_4 \omega\right) \left. \right]$$

$$0 = t_2 - 2t_3 + t_4 \quad t_5 = \frac{t_e}{2} \quad t_6 = t_e - t_4 \quad t_7 = t_e - t_3 \quad (4.20) - (4.23)$$

$$t_8 = t_e - t_2 \quad t_9 = t_e - t_1 \quad (4.24) - (4.25)$$

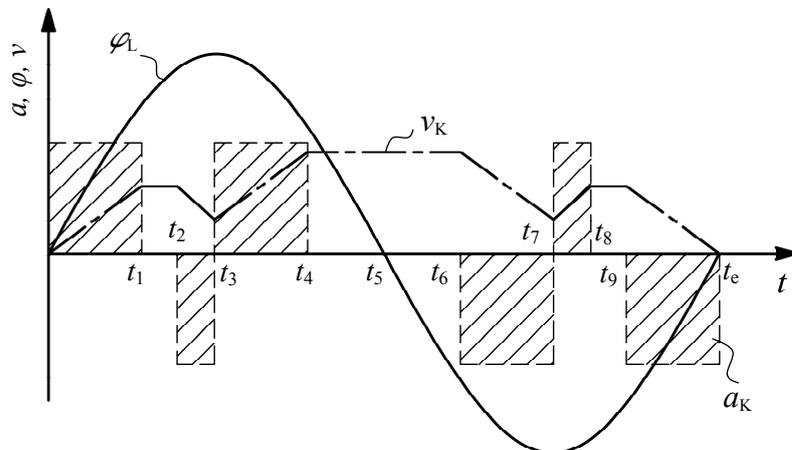


Abb. 4.9

Funktionsprinzip und Berechnungsvorschrift der Strategie 6

4.2 Steuerungsstrategien für eine veränderliche Trageillänge

Die Änderung der Trageillänge während dem Verfahren hat weitreichende Auswirkungen auf das Pendelverhalten, wodurch die Berechnung der Bewegungsgleichungen und mathematischen Modelle wesentlich aufwendiger wird. Bei trapezförmigen Trageilanordnungen ändert sich zudem der Trageilwinkel während dem Heben oder Senken der Last und muss daher ebenfalls bei der Berechnung der Bewegungsgleichungen berücksichtigt werden. Die in Kap. 4.1 vorgestellten Steuerungsstrategien werden für eine konstante Trageillänge während des Verfahrens berechnet und können während der Positionierung nicht auf Veränderungen bei den voreingestellten Parametern reagieren.

Die einfachste Möglichkeit, eine Änderung der Trageillänge bei der Anwendung von Steuerungsstrategien zu berücksichtigen, ist die sequentielle Durchführung der Katz- und Hubbewegung. Hierbei können allerdings nur akzeptable Positionierungszeiten erreicht werden, wenn die Hubbewegung stattfindet, während die Laufkatze mit konstanter Geschwindigkeit verfährt. Bei großen Fahrdistanzen der Laufkatze und vergleichsweise geringen Verfahrensgeschwindigkeiten, wie sie z.B. bei Containerkränen auftreten können, ist eine sequentielle Durchführung der Katz- und Hubbewegung durchaus möglich. In Lagersystemen sind die Fahrdistanzen zu kurz und die Verfahrensgeschwindigkeiten zu groß, so dass eine sequentielle Durchführung der Katz- und Hubbewegung negative Auswirkungen auf die Spielzeiten hat.

Damit eine pendelfreie Positionierung bei einer synchronen Katz- und Hubbewegung möglich ist, wurden in der Vergangenheit zahlreiche Steuerungsstrategien für eine variable Trageillänge während des Verfahrens entwickelt. Dabei werden zum pendelfreien Verfahren entwe-

der die Steuerungsstrategien für eine konstante Tragseillänge modifiziert, oder es werden spezielle Strategien, die i.d.R. mit Optimierungsalgorithmen bestimmt wurden, verwendet.

Eine Möglichkeit zur Modifikation der Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 ist die Berechnung der Beschleunigungsintervalle mit dem Mittelwert der Tragseillänge. In der Patentschrift /PAT87/ wird vorgeschlagen, dass die Tragseillänge bei der halben Hub- oder Senkzeit zur Berechnung der Steuerungsstrategien verwendet wird (s. 4.26). Dem gegenüber wird in der Patentschrift /PAT88/ der Mittelwert der Funktion der Tragseillängenänderung für die Berechnung der Steuerungsstrategien eingesetzt (s. 4.27).

$$l_m = l_0 - v_H \frac{t_H}{2} \quad (4.26)$$

$$l_m = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} l(t) dt \quad (4.27)$$

Eine weitere Möglichkeit zur Modifikation der bekannten Steuerungsstrategien entsteht durch den Einsatz von Korrekturtermen. Dabei werden entweder die Beschleunigungsintervalle mit Korrekturwerten multipliziert, um eine Anpassung der Steuerungsstrategien an eine veränderliche Tragseillänge zu realisieren /PAT94/, oder es werden Korrekturwerte zu den Schaltzeiten addiert oder subtrahiert /PAT82a/. Die Bestimmung der Korrekturterme erfolgt durch Simulationen oder Versuche.

Eine Vorgehensweise zur Modifikation der bekannten Steuerungsstrategien, die besonders in aktuellen Veröffentlichungen beschrieben wird, ist das Input-Shaping. Bei dieser Methode werden die Steuerungssignale von einem Vorfilter, dem sogenannten „Input-Shaper“ verändert. Der „Input Shaper“ ist eine Art Finite Impulse Response (FIR-) Filter und besteht aus mehreren aufeinander folgenden Impulsen. Im Vergleich zu üblichen FIR-Filtern besitzt der „Input-Shaper“ keine Frequenzbeschränkung /ROB02/.

Die Funktionsweise des „Input Shapers“ beruht im einfachsten Fall darauf, dass durch Einsatz des Filters bei einem schwingungsfähigen System 2. Ordnung Schwingungsantworten erzeugt werden, die sich gegenseitig überlagern und aufheben. Damit sich die Schwingungen gegenseitig aufheben können, müssen die Impulse des Filters entsprechend der **Abb. 4.10** angeordnet sein. Darüber hinaus muss das betrachtete System eine Dämpfung besitzen, damit das Input-Shaping angewendet werden kann /SIN02/. Bei Kransystemen entsteht eine Dämpfung der Pendelschwingungen durch irreversible Einflüsse und die Veränderung der Tragseillänge, während die Last schwingt.

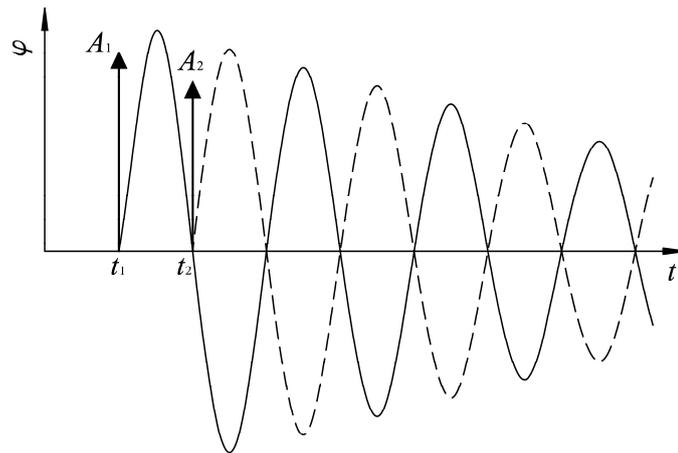


Abb. 4.10 Funktionsweise des Input-Shaping (in Anlehnung an /HUB09/)

Zur Auslegung eines „Input-Shaper“ werden die Amplituden und die Zeitabstände der Impulse Δt_i anhand der Eigenkreisfrequenz und des Dämpfungsgrades des Systems berechnet. Die eigentliche Filterung der berechneten Steuerungsstrategien erfolgt schließlich durch die Faltung der Beschleunigungs- und Verzögerungsintervalle mit dem Input-Shaper. Eine negative Auswirkung des Input-Shaping ist die Verlängerung der Positionierungszeiten gegenüber dem Einsatz einer ungefilterten Steuerungsstrategie. Darüber hinaus verschlechtert sich die Wirkungsweise der Input-Shaper, wenn die Eigenkreisfrequenz und der Dämpfungsgrad von den vorausgesetzten Werten abweichen. Die Positionierungsdauer und die Robustheit der Input-Shaper beeinflussen sich gegenseitig negativ /SIN92/. Zur Reduzierung der Positionierungszeiten oder Steigerung der Robustheit sind zahlreiche Input-Shaper bekannt.

Der am einfachsten herzuleitende Input-Shaper besitzt zwei Impulse und wird als Zero Vibration (ZV-) Shaper bezeichnet. Die Matrize in Gl. 4.28 beschreibt die Berechnungsvorschrift für diesen Shaper /TOK08/. In der **Abb. 4.11** ist schematisch dargestellt, wie aus dem Steuersignal durch die Faltung mit dem ZV-Shaper das modifizierte Steuersignal entsteht.

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ 0 & t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1+K & 1+K \\ 0 & 0,5T_d \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad K = e^{\frac{-D\pi}{\sqrt{1-D^2}}} \quad (4.28)$$

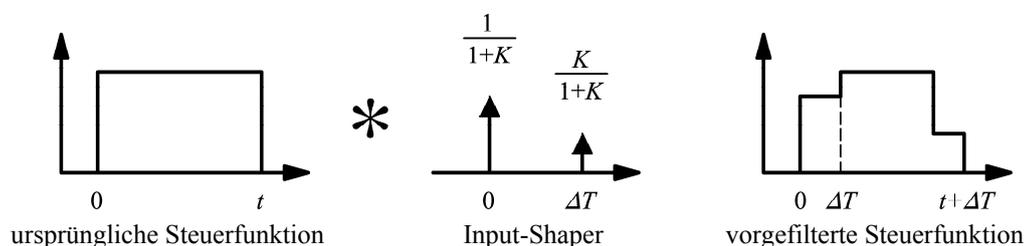


Abb. 4.11 Funktionsweise des ZV-Shaper (In Anlehnung an /FOR06/)

Die Qualität eines Input-Shapers kann durch die quantitative Angabe der Restschwingungen bestimmt werden. Dazu wird ein dimensionsloses Restschwingungsmaß $V(\omega, D)$ verwendet /GÜR08/ (s. (4.29)). Dieses dimensionslose Restschwingungsmaß beschreibt das Verhältnis

zwischen der Restschwingungsamplitude, die aufgrund der Impulsfolge entstanden ist, zu dem Verhältnis der Restschwingungsamplitude, die aufgrund eines Einheitsimpulses entsteht.

$$V(\omega, D) = e^{-D\omega_N} \sqrt{C^2(\omega, D) + S^2(\omega, D)} \quad (4.29)$$

$$C(\omega, D) = \sum_{i=1}^N A_i e^{D\omega_i} \cos\left(\omega\sqrt{1-D^2}t_i\right) \quad (4.30)$$

$$S(\omega, D) = \sum_{i=1}^N A_i e^{D\omega_i} \sin\left(\omega\sqrt{1-D^2}t_i\right) \quad (4.31)$$

Unter der Voraussetzung, dass alle Systemparameter exakt bekannt sind, erfüllt der ZV-Shaper die Bedingung nach Gl. 4.32. Eine Verbesserung der Robustheit gegenüber Modellierungsfehler kann erreicht werden, wenn ein Input-Shaper unter der zusätzlichen Berücksichtigung von Gl.4.33 entwickelt wird.

$$V(\omega, D) = 0 \quad (4.32)$$

$$\frac{dV(\omega, D)}{d\omega} = 0 \quad (4.33)$$

Ein Input-Shaper, der die Bedingungen nach Gl. 4.32 und Gl. 4.33 erfüllt, wird als ZVD-Shaper bezeichnet und besitzt im Vergleich zu dem ZV-Shaper drei Impulse, wodurch die Positionierungszeit im Vergleich zum ZV-Shaper erhöht wird /KUR04/.

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ 0 & t_2 & t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+2K+K^2} & \frac{2K}{1+2K+K^2} & \frac{K^2}{1+2K+K^2} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_d} & \frac{2\pi}{\omega_d} \end{bmatrix} \quad \text{mit } K = e^{\frac{-D\pi}{\sqrt{1-D^2}}} \quad (4.34)$$

Eine weitere Steigerung der Unempfindlichkeit eines Input-Shaper kann mit Extra-Insensitive (EI-) Shapern erreicht werden. Diese Shaper werden unter der Voraussetzung gebildet, dass kleine Restschwingungen erlaubt sind und somit die Gl. 4.32 nicht gleich null ist. Als akzeptable Grenze wird im Allgemeinen eine Restschwingung von 5 % anerkannt. Die EI-Shaper werden daher i.d.R. für diese Restschwingungen ausgelegt. Neben den grundlegenden Input-Shapern nach Gl. 4.28 und Gl. 4.34 wurden zahlreiche weitere Varianten entwickelt. Eine ausführliche Darstellung dieser Input-Shaper kann den Ausführungen von *Singhose* oder *Margono* entnommen werden (/SIN97/, /MAR04/).

Zur Darstellung der theoretischen Robustheit von Input-Shapern werden Sensitivitätskurven verwendet. In diesen Sensitivitätskurven ist das dimensionslose Restschwingungsmaß $V(\omega, D)$ in Abhängigkeit der Abweichung zwischen den tatsächlich vorhandenen Eigenkreisfrequenzen ω_a und den vorausgesetzten Eigenkreisfrequenzen ω_l wiedergegeben. Das Diagramm in **Abb. 4.12** zeigt die Sensitivitätskurven für den ZV-, ZVD- und den EI-Shaper.

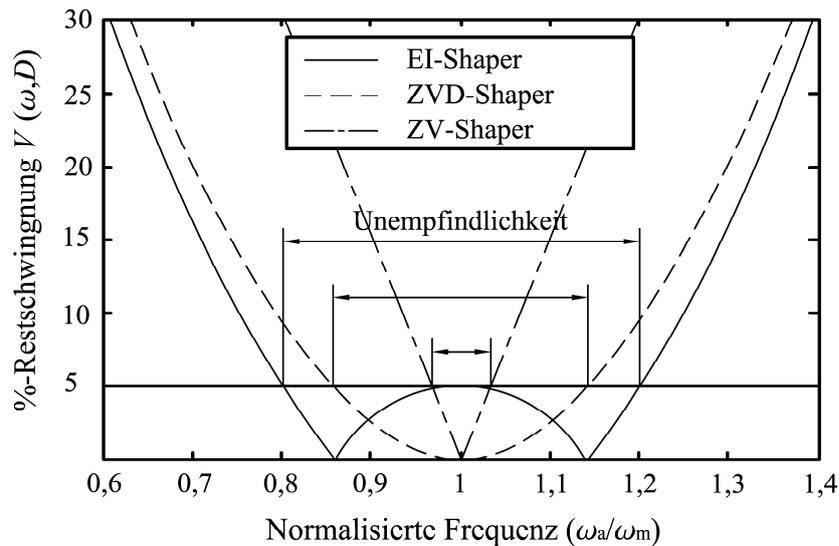


Abb. 4.12 Sensitivitätskurven für ZV-, ZVD- und EI-Shaper /SIN97/

Neben den beschriebenen Varianten zur Modifikation der Steuerungsstrategien wurden von unterschiedlichen Autoren spezielle Steuerungsstrategien für eine veränderliche Trageillänge während des Verfahrens entwickelt. Die Kompensation des Lastpendelns wird bei diesen Strategien i.d.R. durch Beschleunigungs- und Verzögerungsverläufe erreicht, deren Beschleunigungswerte zwischen den Schaltzeitpunkten nicht konstant sind (vgl. /SAK82/, /LEE05/ oder /PAT82b/). Zur Erzeugung dieser Beschleunigungs- und Verzögerungsverläufe wird die Kraft als Steuergröße verwendet.

5 Mathematische Modellbildung

Für die Untersuchung und Bewertung von Steuerungsstrategien durch Simulationen werden mathematische Modelle der Pendelbewegung von Kranen mit paralleler (s. **Abb. 5.1** links) und trapezförmiger Anordnung (s. **Abb. 5.1** rechts) der Tragseile benötigt. Da die Verfahrgeschwindigkeiten wichtige Aspekte für die Leistungsfähigkeit und die Positionierung von automatisierten Kranen sind, werden elektrische Antriebe in Fördermitteln oftmals drehzahl geregelt. Aus diesem Grund werden bei der Modellbildung automatisierte Krane mit drehzahl geregelten Antrieben ausschließlich betrachtet.

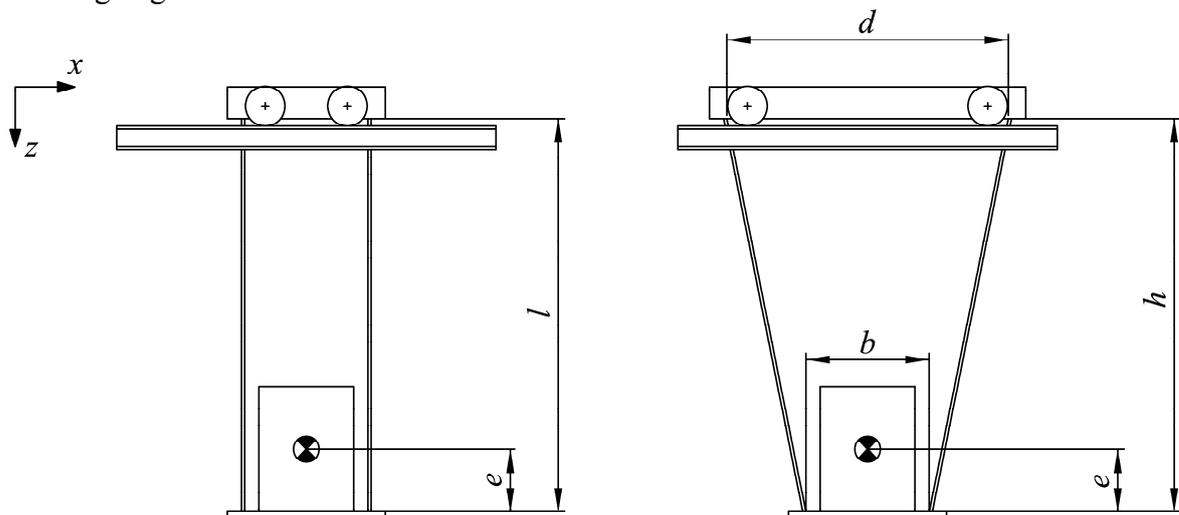


Abb. 5.1 Tragseilanordnung bei Kranen. (links: parallele Tragseilanordnung; rechts: trapezförmige Tragseilanordnung)

Grundlage der mathematischen Modellbildungen in dieser Arbeit ist die Lagrange-Gleichung /GSEW99/.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_{\text{Kin}}}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial E_{\text{Kin}}}{\partial q} = \bar{Q} \quad (5.1)$$

Ausgehend von der Annahme, dass die Tragkonstruktion des Krans hinreichend steif ist und die Schwingungen in der x - z -Ebene entkoppelt von den Schwingungen in der y - z -Ebene und der x - y -Ebene auftreten, wird das gesamte Kransystem als schwingungsfähiges System mit einem Freiheitsgrad betrachtet. Die Zulässigkeit dieser Vereinfachung wurde bereits von anderen Autoren nachgewiesen (s. z.B. /AUE86/). Darüber hinaus werden die folgenden Voraussetzungen für die Modellbildung festgelegt:

- Die Tragseile besitzen keine Masse und sind dehnungsfrei.
- Im gesamten Antriebssystem sind keine irreversiblen Einflüsse vorhanden.
- Das LAM ist reibungsfrei mit den Seilen verbunden.
- Der Luftwiderstand des LAM besitzt keinen Einfluss auf das Lastpendeln.

5.1 Parallele Tragseilanordnung

Aufgrund der parallelen Anordnung der Tragseile kann das LAM ausschließlich translatorische Bewegungen ausführen. Eine Roll- oder Nickbewegung des LAM wird durch diese Seilanordnung verhindert. Verursacht wird das Lastpendeln durch Trägheitskräfte bei dem Beschleunigen und Verzögern der Laufkatze. Darüber hinaus wird das Lastpendeln in realen Kransystemen zusätzlich durch äußere Einflüsse, wie z.B. den Luftwiderstand oder die Unebenheiten in der Schiene, angeregt.

Auf der Grundlage von der Skizze in **Abb. 5.2** können die kinetische und die potentielle Energie für das Lastpendeln in der x - z -Ebene bestimmt werden. Als generalisierte Koordinaten wird $\bar{q} = [x(t), \varphi(t), l(t)]^T$ festgelegt.

$$E_{\text{Kin}} = \frac{1}{2} m_K \dot{x}_{s,K}^2 + \frac{1}{2} m_L \left((\dot{x}_{s,L} - \dot{l}(t) \sin(\varphi(t)) - l(t) \dot{\varphi}(t) \cos(\varphi(t)))^2 + (\dot{l}(t) \cos(\varphi(t)) - l(t) \dot{\varphi}(t) \sin(\varphi(t)))^2 \right) \quad (5.2)$$

$$E_{\text{Pot}} = m_L g l(t) (1 - \cos(\varphi(t))) \quad (5.3)$$

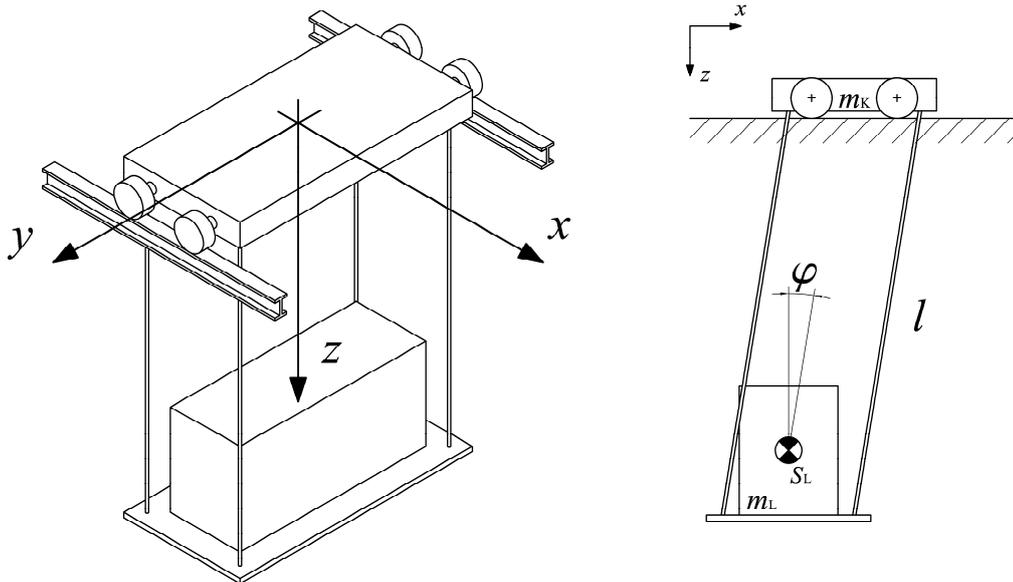


Abb. 5.2 Skizze der parallelen Tragseilanordnung als Grundlage für die mathematische Modellbildung

Die generalisierten Kräfte \bar{Q} setzen sich zusammen aus den konservativen Kräften \bar{Q}_k und den nichtkonservativen Kräften \bar{Q}_n /DRE05/.

$$\bar{Q} = \bar{Q}_k + \bar{Q}_n \quad (5.4)$$

Die nicht konservativen Kräfte \bar{Q}_k werden durch die Differentiation der potentiellen Energie gebildet (s. (5.5)), und die nichtkonservative Kräfte \bar{Q}_n (s. (5.6)) entstehen durch den Antrieb, sofern als Steuergröße die Kraft gewählt wird.

$$\bar{Q}_k = -\frac{\partial E_{\text{pot}}}{\partial q} = \begin{bmatrix} 0 \\ -m_L g l(t) \sin(\varphi(t)) \\ m_L g \cos(\varphi(t)) \end{bmatrix} \quad \bar{Q}_n = \begin{bmatrix} F_{\text{Hor}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.5), (5.6)$$

Durch die Anwendung des Lagrange-Formalismus können schließlich die Bewegungsgleichungen für automatisierte Krane mit einer parallelen Trageilanordnung bestimmt werden.

$$\begin{bmatrix} \frac{m_K + m_L}{m_L} & -\cos(\varphi(t))l(t) & -\sin(\varphi(t)) \\ -\cos(\varphi(t))l(t) & l(t)^2 & 0 \\ -\sin(\varphi(t)) & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{\varphi}(t) \\ \ddot{l}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -2\cos(\varphi(t))\dot{l}(t) & 0 \\ 0 & 2l(t)\dot{l}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\varphi}(t) \\ \dot{l}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sin(\varphi(t))\dot{\varphi}(t)^2 \\ 0 & 0 & g \sin(\varphi(t)) \\ 0 & 0 & -\dot{\varphi}(t)^2 - \frac{g}{l(t)} \cos(\varphi(t)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ \varphi(t) \\ l(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{\text{Hor}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Da i.d.R. drehzahl- bzw. frequenzgeregelte Antriebe in automatisierten Kranen eingesetzt werden, ist die Beschleunigung der Laufkatze die beeinflussbare Steuergröße. Dem entsprechend wird die erste Zeile in Gl. 5.7 nicht benötigt. Durch die Einführung der Beziehung $\ddot{x}(t) = a(t)$ kann die zweite Zeile in der Gl. 5.7 zu der Bewegungsgleichung für das Lastpendeln eines Krans mit paralleler Trageilanordnung umgeformt werden.

$$\ddot{\varphi}(t) = \frac{1}{l(t)} [\cos(\varphi(t))a(t) - 2\dot{l}(t)\dot{\varphi}(t) - g \sin(\varphi(t))] \quad (5.8)$$

Für den Fall einer konstanten Trageillänge ($l(t) = \text{konst.}$) und geringen Winkeländerungen ($\sin(\varphi(t)) \approx \varphi(t)$) während und nach dem Verfahren beschreibt die Differentialgleichung 5.8 einen ungedämpften Schwinger mit der Eigenkreisfrequenz ω .

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l(t)}} \Rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{l(t)}{g}} \quad (5.9), (5.10)$$

5.2 Trapezförmige Trageilanordnung

Im Vergleich zu der parallelen Trageilanordnung kann das LAM bei einer trapezförmigen Trageilanordnung zusätzlich zu der Pendelbewegung eine Rollbewegung um den Massenschwerpunkt ausführen. Die Rollbewegung ist an die Pendelbewegung des LAM gekoppelt und entsteht aufgrund einer ungleichmäßigen Kraftverteilung in den Trageilen bei der Auslenkung des LAM. Aufgrund der Kopplung von Pendel- und Rollbewegung besitzt die trapez-

förmige Tragseilanordnung einen schwingungsfähigen Freiheitsgrad in der x - z -Ebene. Die **Abb. 5.3** zeigt die Auslenkung des LAM bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung. Als generalisierte Koordinaten wird $\bar{q} = [x(t), \delta(t), l(t)]^T$ verwendet.

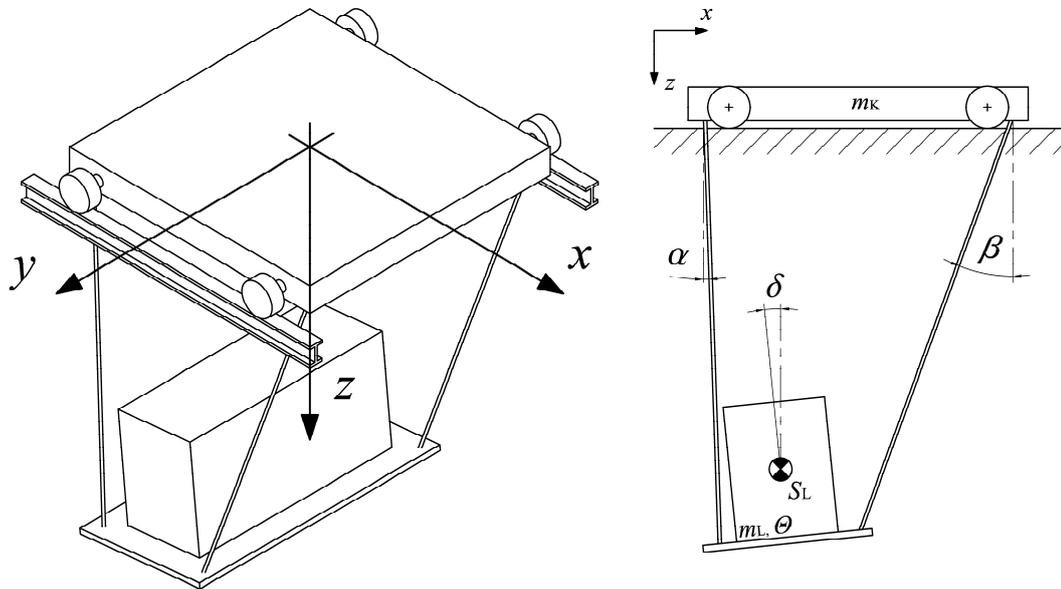


Abb. 5.3 Auslenkung des LAM bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung

Das Lastpendeln des LAM und die Auslenkung der Tragseile aus der Ruhelage werden durch den Winkel $\alpha(t)$ beschrieben. Aufgrund der trapezförmigen Tragseilanordnung entstehen die folgenden geometrischen Zusammenhänge:

$$l(t)\sin(\beta(t)) = d - l(t)\sin(\alpha(t)) - b\cos(\delta(t)) \quad (5.11)$$

$$l(t)\cos(\beta(t)) = l(t)\cos(\alpha(t)) - b\sin(\delta(t)) \quad (5.12)$$

Das Quadrieren und anschließende Summieren der Gl. 5.11 und 5.12 ergibt schließlich die Gl. 5.13 bzw. Gl. 5.14.

$$d^2 - 2bd\cos(\delta(t)) + b^2 + \sin(\alpha(t))(2bl(t)\cos(\delta(t))) - 2dl(t) - 2bl(t)\cos(\alpha(t))\sin(\delta(t)) = 0 \quad (5.13)$$

$$\Rightarrow A \cos(\alpha(t)) + B \sin(\alpha(t)) + C = 0 \quad (5.14)$$

$$A = -2 b l(t) \sin(\delta(t)) \quad (5.15)$$

$$B = 2 b l(t) \cos(\delta(t)) - 2 d l(t) \quad (5.16)$$

$$C = b^2 + d^2 - 2 b d \cos(\delta(t)) \quad (5.17)$$

Durch Umstellen der Gl. 5.14 und der Anwendung des „trigonometrischen Pythagoras“ (/PAP07/), kann der Zusammenhang zwischen dem Winkel $\alpha(t)$ und dem Winkel $\delta(t)$ hergeleitet werden (s. Gl. 5.18).

$$\alpha(t) = \arccos\left(\frac{-AC + B\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2}\right) \quad (5.18)$$

Da die eingesetzten trigonometrischen Funktionen in dem Wertebereich von $+\pi/4$ bis $-\pi/4$ näherungsweise linear verlaufen, kann ein konstanter Umrechnungsfaktor n zwischen dem Winkel $\alpha(t)$ und $\delta(t)$ bestimmt werden. Ändert sich die Trageillänge während dem Verfahren des Krans, ist der Umrechnungsfaktor n nicht mehr konstant. Voruntersuchungen haben allerdings gezeigt, dass diese Änderung bei den betrachteten Hubvorgängen sehr gering ist und somit die Verwendung eines gemittelten Umrechnungsfaktors n_m möglich ist.

Ebenso wie der Umrechnungsfaktor n ändert sich bei dem Heben und Senken der Last auch der Trageilwinkel α_0 , der den Winkel zwischen dem LAM und den Trageilen im Stillstand beschreibt. Damit eine Berechnung der Bewegungsgleichungen mit vertretbarem zeitlichem Aufwand möglich ist, wird bei einer variablen Trageillänge die Änderung des Winkels α_0 durch den konstanten Mittelwert α_m berücksichtigt. Aufgrund der beschriebenen Vereinfachungen kann bei der Herleitung der Bewegungsgleichungen der Winkel $\delta(t)$ direkt durch die Beziehung $\alpha_m - n_m \alpha(t)$ ersetzt werden.

Als Grundlage für die Ermittlung der Bewegungsgleichung wird, wie bereits in Kap. 5 beschrieben, der Lagrange-Formalismus angewendet. Anhand der kinematischen Zusammenhänge in Gl. 5.19 und Gl. 5.20 kann die kinetische Energie für die trapezförmige Trageilanordnung ermittelt werden.

$$\bar{x}_K = \begin{bmatrix} x_K(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

$$\bar{x}_L = \begin{bmatrix} x_L(t) - \frac{d}{2} + l(t) \sin(\alpha(t)) + \frac{b}{2} \cos(\alpha_m - n_m \alpha(t)) + e \sin(\alpha_m - n_m \alpha(t)) \\ -l(t) \cos(\alpha(t)) + \frac{b}{2} \sin(\alpha_m - n_m \alpha(t)) - e \cos(\alpha_m - n_m \alpha(t)) \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial \bar{x}_K}{\partial t} = \bar{v}_K = \begin{bmatrix} \dot{x}_K(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial \bar{x}_L}{\partial t} = \bar{v}_L = \begin{bmatrix} \dot{x}_L(t) + \dot{\alpha}(t) \left[\frac{1}{2} b n_m \sin(\alpha_m - n_m \alpha(t)) - e n_m \cos(\alpha_m - n_m \alpha(t)) \right] \\ -\dot{l}(t) \cos(\alpha(t)) + \dot{\alpha}(t) \left[l(t) \sin(\alpha(t)) - \frac{1}{2} b n_m \cos(\alpha_m - n_m \alpha(t)) \right. \\ \left. + \cos(\alpha(t)) l(t) \right] + \sin(\alpha(t)) \dot{l}(t) \\ \left. - e n_m \sin(\alpha_m - n_m \alpha(t)) \right] \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_K |\mathbf{v}_K(t)|^2 + \frac{1}{2} m_L |\mathbf{v}_L(t)|^2 + \frac{1}{2} \theta |\dot{\delta}(t)|^2 \quad (5.23)$$

Mit der potentiellen Energie lassen sich die konservativen Kräfte bestimmen. Wie bereits in Kap. 5.1 erläutert worden ist, resultieren die nichtkonservativen Kräfte von den Antriebsmotoren.

$$E_{\text{pot}} = m_L g (h_S - z_L) = m_L g [h_S - (l(t) \cos(\alpha(t)) - (b/2) \sin(\alpha_m - n_m \alpha(t)) - e \cos(\alpha_m - n_m \alpha(t)))] \quad (5.24)$$

$$Q_k = -\frac{\partial E_{\text{pot}}}{\partial q} = -\left[m_L g \left(+l(t) \sin(\alpha(t)) - \frac{1}{2} b n_m \cos(\alpha_m - n_m \alpha(t)) + e n_m \sin(\alpha_m - n_m \alpha(t)) \right) \right] \quad (5.25)$$

$$Q_n = \begin{bmatrix} F_{\text{Hor}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Durch die Anwendung des Lagrange-Formalismus kann schließlich die Bewegungsgleichung des LAM für den Winkel $\alpha(t)$ aufgestellt werden (s. 5.27). Damit eine Implementierung der Bewegungsgleichung im Simulator mit einem vertretbaren Zeitaufwand möglich ist, muss die Bewegungsgleichung linearisiert werden. Dazu werden die Kosinus und Sinus-Terme durch Näherungswerte ersetzt ($\sin(\alpha) \approx \alpha$ und $\cos(\alpha) \approx 1$) /STÖ07/. Darüber hinaus werden für kleine Winkel die Annahmen $\alpha^2 \rightarrow 0$ und $\dot{\alpha}^2 \rightarrow 0$ getroffen.

$$\ddot{\alpha}(t) + \frac{B}{A} \dot{\alpha}(t) + \frac{C}{A} \alpha(t) = \frac{D}{A} \ddot{x}(t) + \frac{E}{A} \ddot{l}(t) + \frac{F}{A} \quad (5.27)$$

$$A = 4n_m^2 \Theta + b^2 n_m^2 m_L + 4e^2 n_m^2 m_L + 4\alpha_m b n_m l(t) m_L - 8e n_m l(t) m_L + 4l(t)^2 m_L - 4b n_m l(t) m_L \alpha(t) - 8\alpha_m e n_m l(t) m_L \alpha(t) - 4b n_m^2 l(t) m_L \alpha(t) - 8\alpha_m e n_m^2 l(t) m_L \alpha(t) \quad (5.28)$$

$$B = -2m_L \dot{l}(t) (-2\alpha_m b n_m + 4e n_m - 4l(t) + 2b n_m \alpha(t) + 4\alpha_m e n \alpha(t) + 2b n^2 \alpha(t) + 4\alpha_m e n^2 \alpha(t)) \quad (5.29)$$

$$C = -2m_L (\alpha_m b g n_m^2 + 2e g n_m^2 - 2g l(t) - \alpha_m b n_m \ddot{l}(t) + 2e n_m \ddot{l}(t) - \alpha_m b n_m^2 \ddot{l}(t) + 2e n_m^2 \ddot{l}(t) + b n_m^2 \ddot{x}(t) + 2\alpha_m e n_m^2 \ddot{x}(t)) \quad (5.30)$$

$$D = 2m_L(-\alpha_m b n + 2e n - 2l(t)) \quad (5.31)$$

$$E = 2m_L(-b n_m - 2\alpha_m e n_m m_L) \quad F = 2m_L(b g n_m - 2\alpha_m e g n_m) \quad (5.32), (5.33)$$

Da der Winkel $\alpha(l)$ im Ruhezustand nicht Null ist und sich der Winkel α_0 bei dem Heben und Senken der Last ändert, muss der Winkel α_m von den Simulationsergebnissen subtrahiert werden, damit ein einfacher Vergleich mit den übrigen Simulationsergebnissen möglich ist.

5.3 Implementierung der mathematischen Modelle im Simulator

Zur Simulation der Bewegung von automatisierten Kranen anhand der mathematischen Modelle wird die Simulationssoftware SIMULINK der Firma MATHWORKS eingesetzt. Dabei werden alle Simulationen mit der Programmversion 6.4 durchgeführt. Zur Bestimmung eines geeigneten Solvers wurde vor der Durchführung der Simulationsuntersuchung eine bekannte Pendelbewegungen mit den verfügbaren Solvern simuliert. Der Vergleich der Simulationsergebnisse hat gezeigt, dass der ode23tb-Solver am besten geeignet ist für die Simulation der Pendelbewegung.

Der ausgewählte Solver basiert auf einem implizierten Runge-Kutta-Verfahren, bei dem in der ersten Stufe die Trapezregel nach Euler-Cauchy angewendet wird und anschließend eine Rückwärtsdifferentiation 2. Ordnung erfolgt /SCH08/. Das Hauptanwendungsgebiet des ode23tb-Solvers ist die Lösung von steifen Differentialgleichungen, bei denen bestimmte Zustände in Form von Schaltvorgängen von der numerischen Lösung detektiert werden müssen /HOF02/.

Der Aufbau des Simulationsmodells für eine parallele und trapezförmige Tragseilanordnung ist in der **Abb. 5.4** und **Abb. 5.5** dargestellt. Die horizontale Beschleunigung der Laufkatze und die vertikale Beschleunigung des LAM werden in den Simulationsmodellen mit Hilfe von Kennlinien nachgebildet. Aus den Beschleunigungsverläufen werden durch Integrationen die übrigen Parameter, wie z.B. die Katzensgeschwindigkeit und die Tragseillänge, abgeleitet. Bei dem Simulationsmodell für die trapezförmige Tragseilanordnung ist die Differentialgleichung aufgrund des Umfangs in Untersystemen programmiert, die als Blöcke innerhalb des Hauptsystems von dem Programm aufgerufen werden. Zur Implementierung der entwickelten mathematischen Modelle wurden vorwiegend Standard-Blöcke aus SIMULINK verwendet.

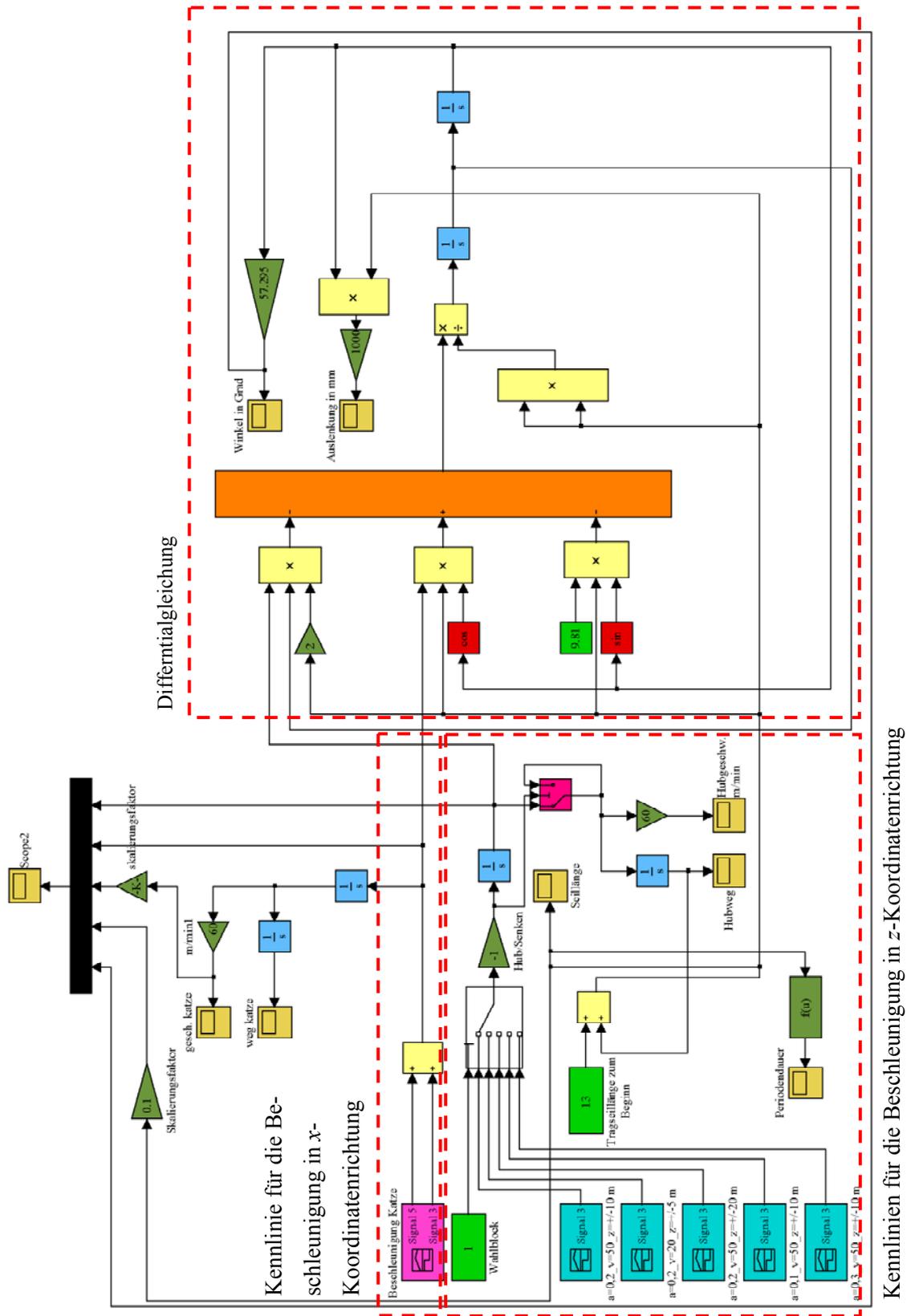


Abb. 5.4 Modell zur Simulation des Lastpendelns eines Krans mit paralleler Tragseilanordnung in SIMULINK

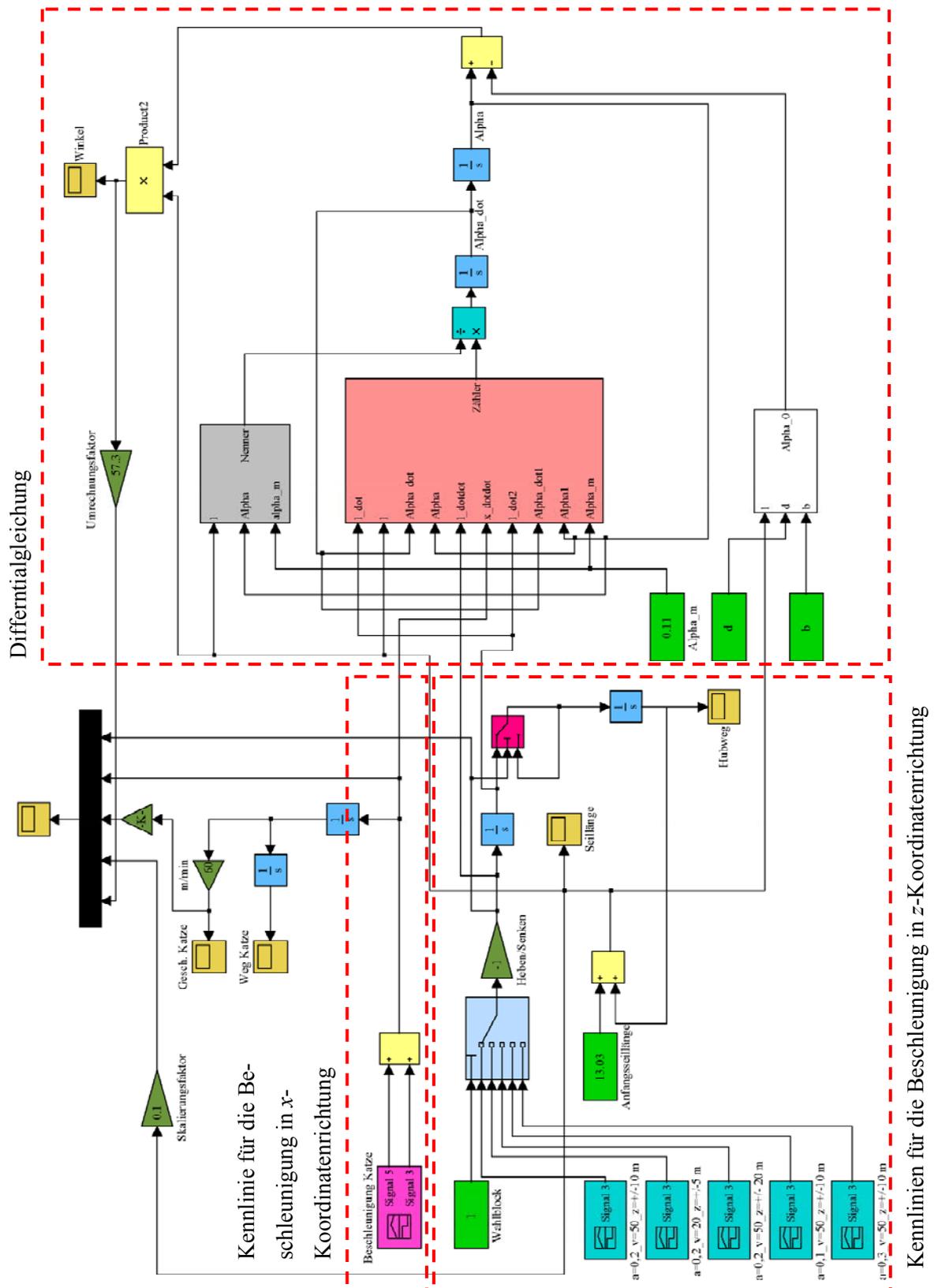


Abb. 5.5 Modell zur Simulation des Lastpendelns eines Krans mit trapezförmigen Tragseilanordnung in SIMULINK

In dem Diagramm in **Abb. 5.6** sind beispielhaft zwei Simulationsergebnisse dargestellt, die mit den beschriebenen Simulationsmodellen erstellt worden sind. Zum Vergleich der beiden Simulationsmodelle sind die Parameter bei den Simulationen mit einer trapezförmigen Tragseilanordnung so eingestellt, dass eine parallele Tragseilanordnung entsteht (Bei einer parallelen Tragseilanordnung ist $d = b$). Bei beiden Simulationsexperimenten wurde eine Tragseillänge von 13 m eingestellt und die Laufkatze entsprechend der *Strategie 1* verfahren. Die Simulationen zeigen, dass die neu entwickelten Simulationsmodelle eine Pendelschwingung erzeugen, die der zu erwartenden Pendelschwingung entspricht. Darüber hinaus sind die Simulationsergebnisse nahezu identisch, weshalb zunächst davon ausgegangen werden kann, dass die mathematischen Modelle und die Implementierung der Modelle in dem Simulator korrekt sind. Eine ausführliche Verifikation der Simulationsmodelle erfolgt mit Hilfe von Modellexperimenten.

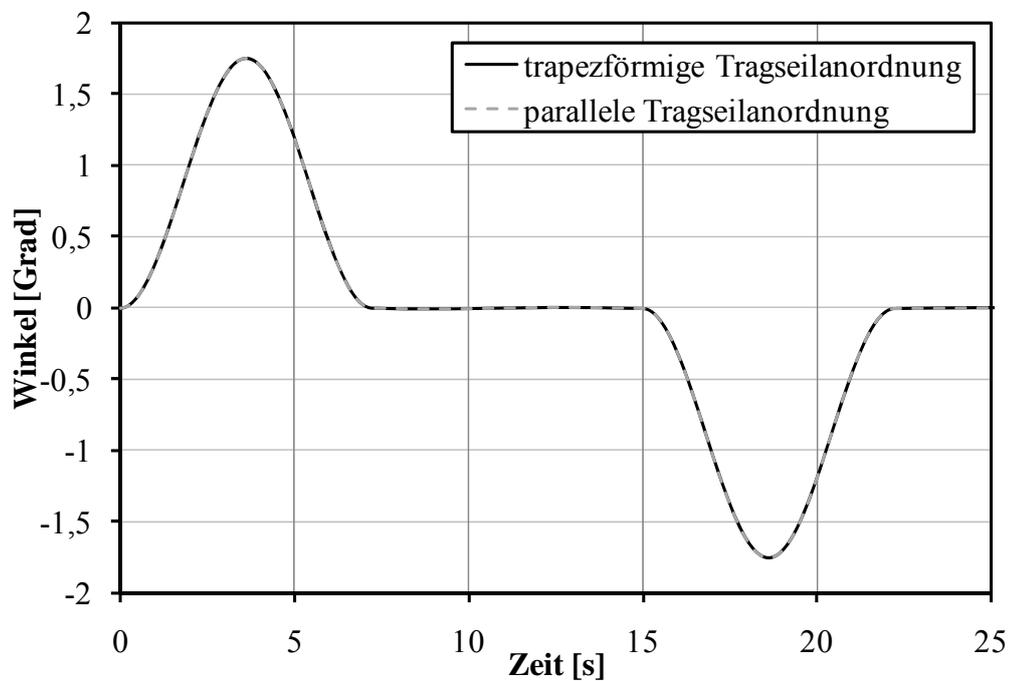


Abb. 5.6 Vergleich der Simulationsergebnisse mit verschiedenen Simulationsmodellen bei einer Tragseillänge von $l = 13$ m

6 Durchführung und Auswertung der Simulation

Der Einsatz von automatisierten Kranen in Lagersystemen unter der Anwendung von Steuerungsstrategien wurde bisher nicht untersucht. Darüber hinaus bestehen zur Zeit kaum Informationen darüber, wie groß das Lastpendeln nach der Positionierung eines Krans ist, wenn die Last während dem Verfahren der Laufkatze gehoben wird oder geometrische und/oder kinematische Toleranzen vorhanden sind. Aus den genannten Gründen wird das Lastpendeln von automatisierten Kranen mit Hilfe von Simulationen untersucht, um herauszufinden, welche Steuerungsstrategien am besten dazu geeignet sind, das Lastpendeln von automatisierten Kranen in Lagersystemen zu reduzieren. Neben der Kenntnis über die Eignung der einzelnen Steuerungsstrategien werden die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen für die Auslegung und Konstruktion einer mechanisch wirkenden Dämpfungsvorrichtung zur Feinpositionierung des LAM benötigt.

Die vorhandenen Steuerungsstrategien wurden i.d.R. alle für eine konstante Trageillänge während dem Verfahren des Krans entwickelt. Das bedeutet, dass diese Steuerungsstrategien nur ein orthogonales Verfahren in Lagersystemen ermöglichen. Bei einem diagonalen Verfahren bzw. einer veränderlichen Trageillänge während des Verfahrens können die bekannten Steuerungsstrategien nicht ohne Änderungen angewendet werden.

Zur genauen Untersuchung werden bei den Simulationsversuchen mit einer konstanten Trageillänge während des Verfahrens die Parameter Weg, Trageillänge und die Verfahrensgeschwindigkeit variiert. Bei den Simulationsuntersuchungen mit einer veränderlichen Trageillänge während des Verfahrens wird die Hubgeschwindigkeit als zusätzlicher Parameter berücksichtigt. Die maximale Beschleunigung der Laufkatze in x -Koordinatenrichtung ist für alle Simulationsuntersuchungen mit $a_K = 0,5 \text{ m/s}^2$ festgelegt. Ebenso beträgt die maximale Beschleunigung der Last in z -Koordinatenrichtung maximal $a_L = 0,5 \text{ m/s}^2$. Höhere Beschleunigungen sind aufgrund von wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll.

Die Simulationsergebnisse sind nachfolgend in zwei Hauptkategorien mit jeweils zwei Unterkategorien eingeteilt. Die Hauptkategorien werden anhand der Trageilanordnung gebildet. Bei den Unterkategorien wird zwischen einer konstanten Trageillänge und einer veränderlichen Trageillänge unterschieden.

6.1 Simulation von Steuerungsstrategien für Krane mit paralleler Tragseilanordnung und konstanter Tragseillänge während des Verfahrens

6.1.1 Positionierungszeiten

Für die Bewertung der einzelnen Steuerungsstrategien sind die Positionierungszeit und die maximale Auslenkung des LAM während und nach dem Verfahren von Bedeutung. In der **Abb. 6.1** bis **Abb. 6.4** sind die Positionierungszeiten in Abhängigkeit der Tragseillänge bei der Anwendung von verschiedenen Steuerungsstrategien, unterschiedlich Positionierungstrecken und maximalen Verfahrensgeschwindigkeiten dargestellt. Die Simulationsuntersuchung zeigt, dass die Positionierungszeit mit einer größer werdender Tragseillänge bzw. Periodendauer ansteigt. Dies kann dadurch begründet werden, dass die Dauer der Beschleunigung an die Periodendauer gekoppelt ist. Bei der Anwendung von Steuerungsstrategien muss daher bei einer steigenden Periodendauer die Beschleunigungsdauer ebenfalls vergrößert werden. Wenn gleichzeitig die konstante Verfahrensgeschwindigkeit nicht erhöht werden soll, muss die Intensität der Beschleunigung reduziert werden.

Die Kurvenverläufe in der **Abb. 6.1** bis **Abb. 6.4** besitzen eine Änderung der Kurvensteigung bei einer Tragseillänge von 5 m und 10 m. Diese Änderung der Kurvensteigung entsteht aufgrund der Periodendauer, die in Abhängigkeit der Tragseillänge einen hyperbolischen Kurvenverlauf aufweist.

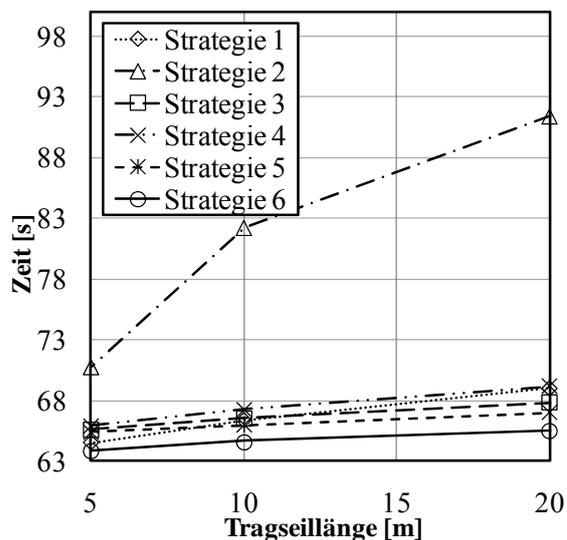


Abb. 6.1 Positionierungszeit in Abhängigkeit der Tragseillänge für eine Geschwindigkeit von $v_K = 100$ m/min und einer Verfahrstrecke von 100 m (Bei einer Tragseillänge von 1 m können nicht alle Steuerungsstrategien angewendet werden).

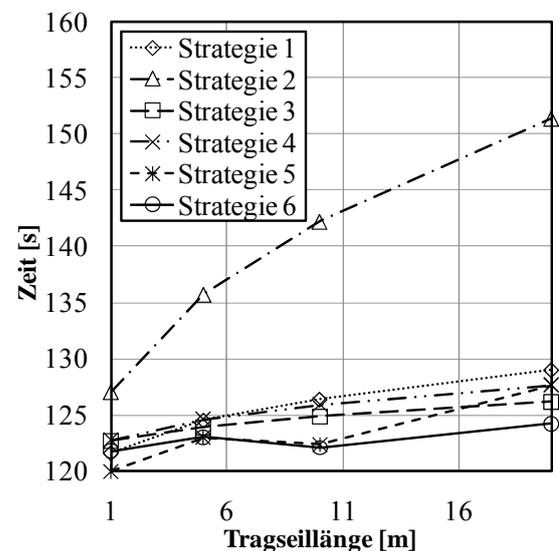


Abb. 6.2 Positionierungszeit in Abhängigkeit der Tragseillänge für eine Geschwindigkeit von $v_K = 50$ m/min und einer Verfahrstrecke von 100 m

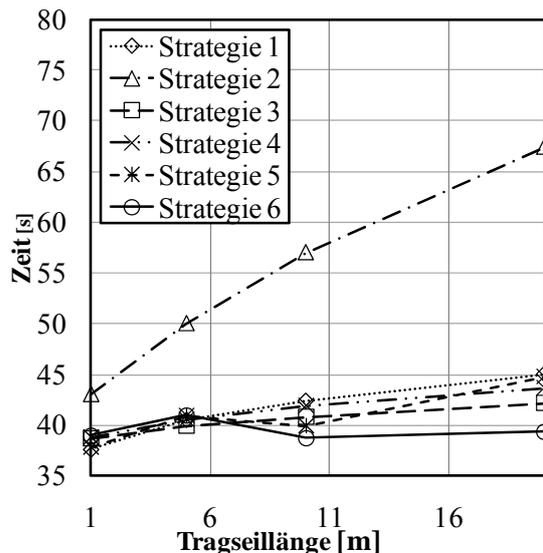


Abb. 6.3 Positionierungszeit in Abhängigkeit der Tragseillänge für eine Geschwindigkeit von $v_K = 50$ m/min und eine Verfahrsstrecke von 30 m

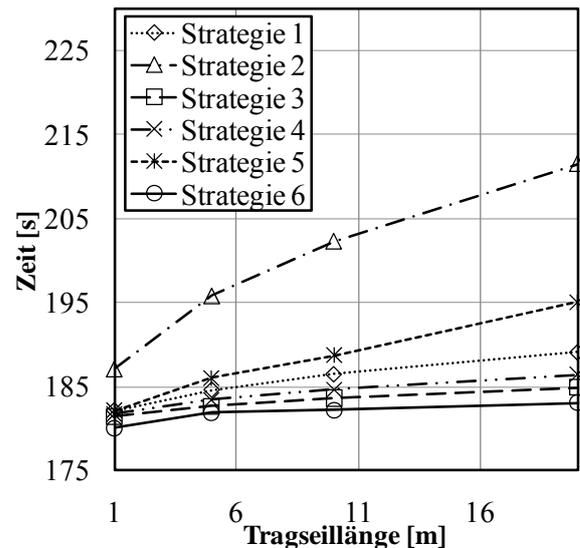


Abb. 6.4 Positionierungszeit in Abhängigkeit der Tragseillänge für eine Geschwindigkeit von $v_K = 10$ m/min und eine Verfahrsstrecke von 30 m

Die kürzesten Positionierungszeiten bei Tragseillängen über 5 m können i.d.R. mit der *Strategie 6* erzielt werden. Unterhalb einer Tragseillänge von 5 m können mit der *Strategie 5* die schnellsten Positionierungszeiten, bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 50 m/min, erreicht werden. Die langsamste Positionierungszeit bei allen Simulationen entsteht bei der Anwendung der *Strategie 2*. Die Positionierungszeiten bei der Anwendung dieser Steuerungsstrategie sind durchschnittlich 26 % langsamer als die Positionierungszeiten bei der Anwendung der schnellsten Steuerungsstrategien. Bei den übrigen Steuerungsstrategien unterscheiden sich die Positionierungszeiten nur gering, so dass eine eindeutige Gliederung der Steuerungsstrategien in eine Rangfolge nicht sinnvoll erscheint.

6.1.2 Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens

Während der Beschleunigung des Krans wird das LAM aufgrund von Trägheitskräften ausgelenkt. Die Höhe der Auslenkung des LAM ist insbesondere von der Intensität der Beschleunigung abhängig. In den Diagrammen in **Abb. 6.5** bis **Abb. 6.7** sind die maximalen Auslenkungen des LAM während der Positionierung, in Abhängigkeit der Tragseillänge und für unterschiedliche Verfahrgeschwindigkeiten dargestellt.

Die geringste Auslenkung während der Positionierung kann mit der *Strategie 2* erzielt werden. Bei der Anwendung der *Strategie 6* entstehen im Allgemeinen die größten Auslenkungen. Eine Ausnahme davon entsteht bei der Positionierung mit der *Strategie 4* und einer Verfahrgeschwindigkeit von 10 m/min. Ab einer Tragseillänge von 10 m ist die Auslenkung des LAM bei der Anwendung der *Strategie 4* und einer Verfahrgeschwindigkeit von 10 m/min größer als bei der Anwendung von *Strategie 6*. Die größte Auslenkung bei allen Versuchen

beträgt 1873 mm und wird bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 100 m/min und einer Tragseillänge von 20 m erreicht. Die Auswertung der Simulationsergebnisse ergibt schließlich die folgende aufsteigende Einteilung der maximalen Auslenkungen, bezogen auf die *Strategie 2*, eine Verfahrgeschwindigkeit von 50 m/min und eine Tragseillänge von 20 m: *Strategie 1*, *Strategie 3*, *Strategie 4*, *Strategie 5* und *Strategie 6*.

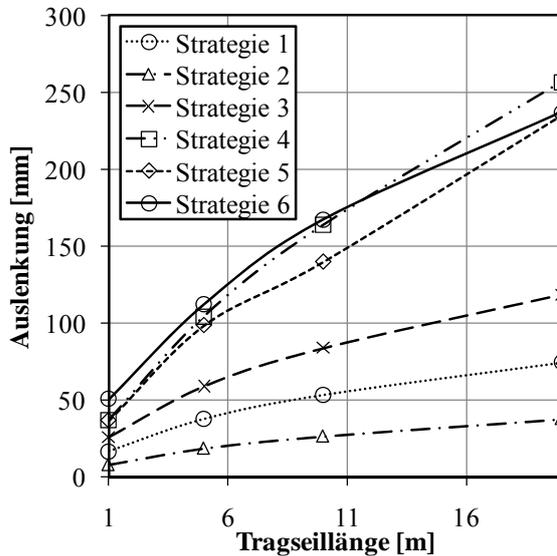


Abb. 6.5 Maximale Auslenkung während des Verfahrens bei einer maximalen Geschwindigkeit von $v_K = 10$ m/min

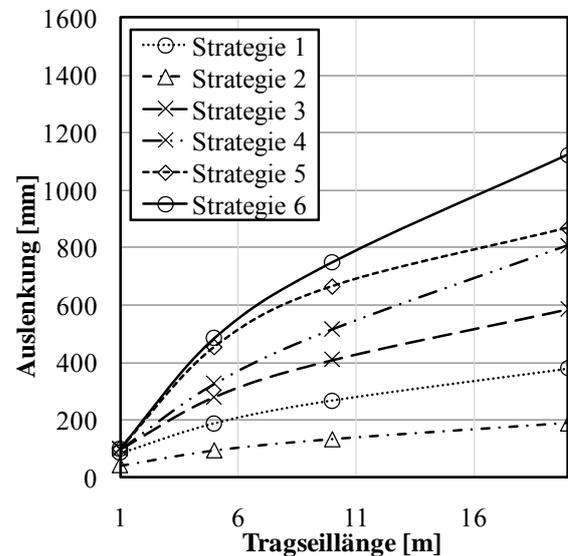


Abb. 6.6 Maximale Auslenkung während des Verfahrens bei einer maximalen Geschwindigkeit von $v_K = 50$ m/min

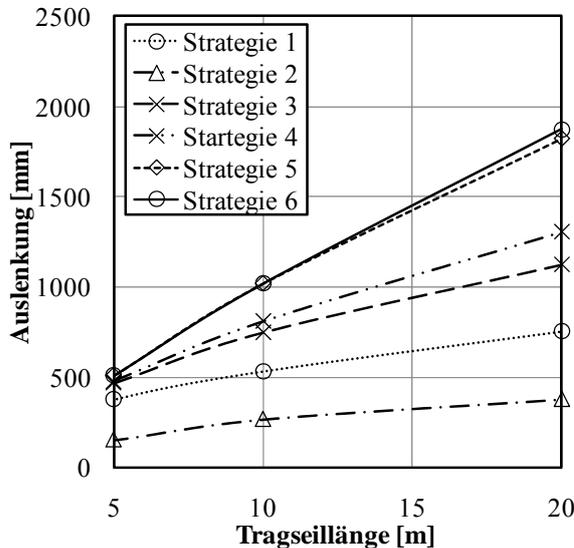


Abb. 6.7 Maximale Auslenkung während des Verfahrens bei einer maximalen Geschwindigkeit von $v_K = 100$ m/min

6.1.3 Maximale Pendelauslenkung nach dem Verfahren unter der Berücksichtigung von kinematischen Toleranzen

Ein weiteres entscheidendes Kriterium für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Steuerungsstrategie ist die Höhe des Lastpendels nach der Positionierung. Theoretisch ermöglichen alle Steuerungsstrategien eine vollständige Eliminierung des Lastpendels. Die Realität und auch die Simulationsuntersuchungen haben allerdings gezeigt, dass eine vollständige Be-

seitigung des Lastpendelns nicht möglich ist. Gründe für ein Lastpendeln nach der Positionierung bei der Anwendung von Steuerungsstrategien sind Toleranzen bei der Berechnung und Ausführung der Schaltzeitpunkte. Werden z.B. die berechneten Schaltzeitpunkte nicht exakt eingehalten, so entsteht zwangsläufig ein Lastpendeln nach der Positionierung. In realen Kransystemen sind darüber hinaus geometrische Toleranzen vorhanden, die sich negativ auf die Funktionsfähig der Steuerungsstrategien auswirken.

Bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Ausgleich des Lastpendelns erfolgt bereits das Verfahren mit konstanter Geschwindigkeit i.d.R. nicht ohne ein geringes Lastpendeln, da die tatsächliche Trageillänge nicht exakt bestimmt werden kann. In Abhängigkeit der Lage der Schaltzeitpunkte des Verzögerungsverlaufs wird dieses Lastpendeln nach der Positionierung verstärkt oder reduziert. Eine maximale Vergrößerung des Lastpendelns tritt auf, wenn der Beginn des Verzögerungsintervalls mit der maximalen Auslenkung des Lastpendelns übereinstimmt. Dem gegenüber erfolgt keine Verstärkung des Lastpendelns, wenn der Beginn des Verzögerungsverlaufs gleichzeitig mit dem Nulldurchgang des Lastpendelns zusammenfällt. In der **Abb. 6.8** und **Abb. 6.9** ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt. Bei den Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich ist die beschriebene Erhöhung des Lastpendelns um ein Vielfaches größer, da das Lastpendeln nach der Beschleunigung größer ist als bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Pendelausgleich.

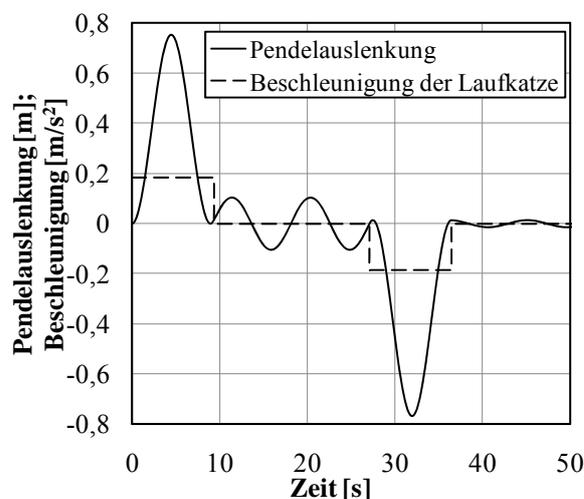


Abb. 6.8 Darstellung des Lastpendelns für den Fall, dass das Verzögerungsintervall gleichzeitig mit dem maximalen Pendelausschlag beginnt.

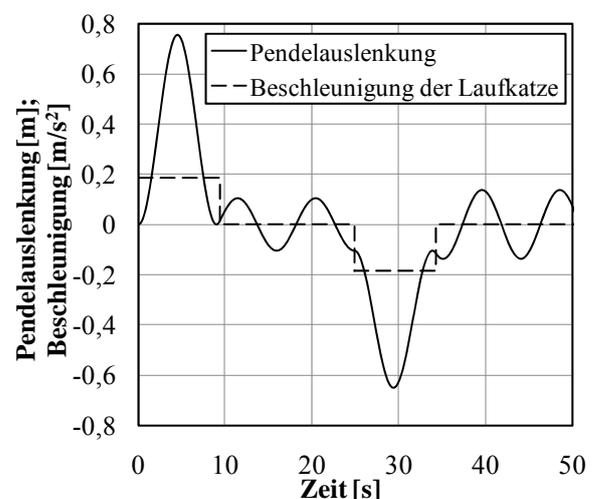


Abb. 6.9 Darstellung des Lastpendelns für den Fall, dass das Verzögerungsintervall gleichzeitig mit dem Nulldurchgang des Lastpendelns beginnt.

Da die Verlagerung des gesamten Verzögerungsintervalls einen entscheidenden Einfluss auf die Pendelauslenkung nach der Positionierung hat, muss dieser Einfluss genau untersucht werden. Das Diagramm in der **Abb. 6.10** zeigt beispielhaft den Verlauf des Lastpendelns nach der Positionierung, in Abhängigkeit einer schrittweisen Verlagerung des gesamten Verzögerungsintervalls und der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem globalen Pendelausgleich.

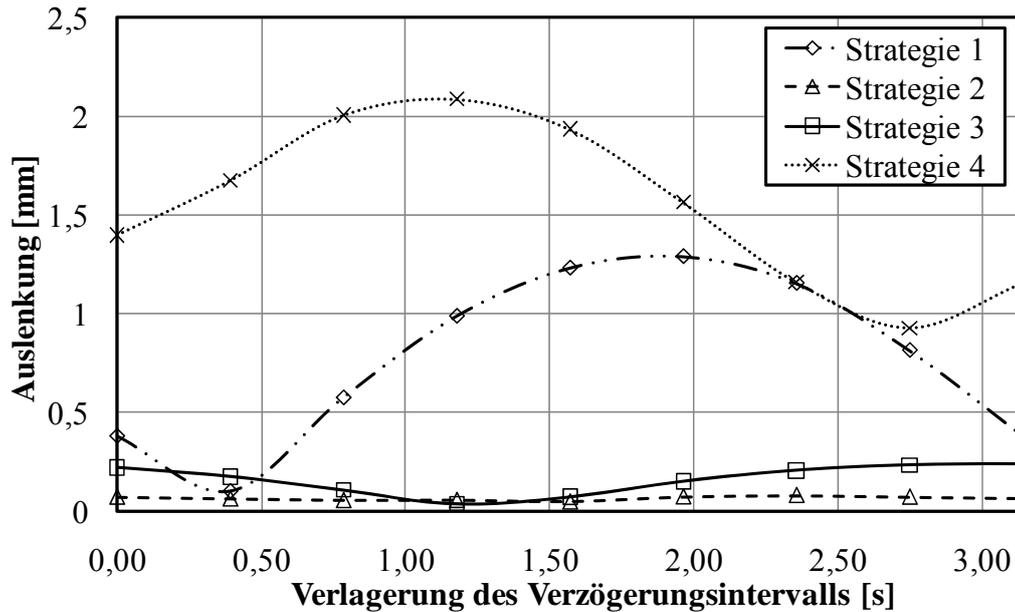


Abb. 6.10 Auslenkung des LAM in Abhängigkeit der Verlagerung der Schaltzeitpunkte für eine Tragseillänge von $l = 10$ m und eine Verfahrgeschwindigkeit $v_K = 50$ m/min

Wie bereits erläutert wurde, zeigen die Simulationsuntersuchungen, dass die Auslenkung sich periodisch verändert. In der **Abb. 6.11** sind die maximalen Auslenkungen nach der Positionierung dargestellt, die in der Simulation von Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich und der Berücksichtigung einer Verlagerung der Verzögerungsintervalle entstehen. Das geringste Lastpendeln kann mit der *Strategie 2* erzielt werden. Dem gegenüber verursacht die *Strategie 4* mit ca. 4,4 mm das größte Lastpendeln nach der Positionierung.

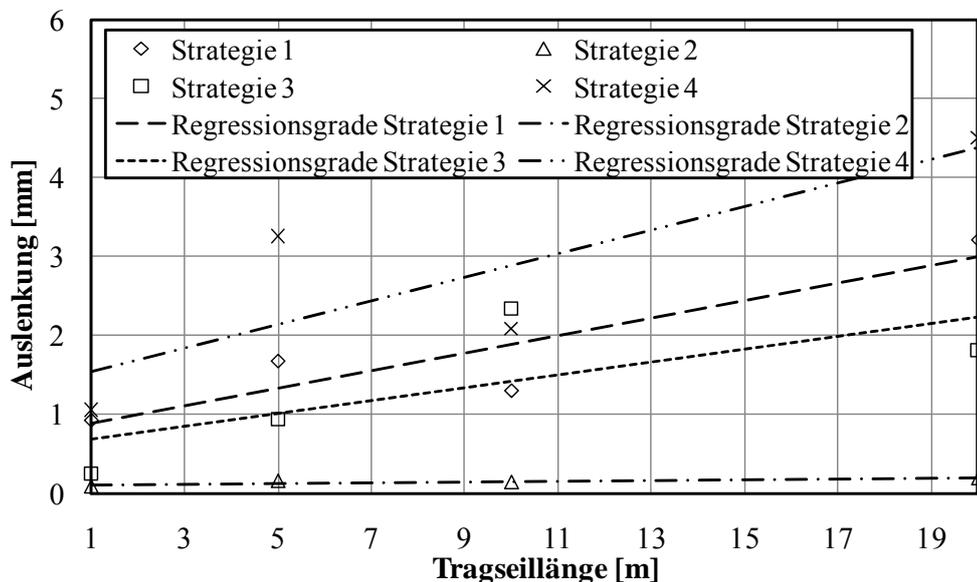


Abb. 6.11 Maximale Positionsabweichung in Abhängigkeit der Tragseillänge bei $v_K = 50$ m/min

Die maximalen Auslenkungen nach der Positionierung infolge einer Verlagerung des Verzögerungsintervalls und der Anwendung von *Strategie 5* sind in den **Abb. 6.12** bis **Abb. 6.14** dargestellt. Die **Abb. 6.15** bis **Abb. 6.17** zeigen die maximalen Auslenkungen bei der Verlagerung des Verzögerungsintervalls für die *Strategie 6*. Im Vergleich zu den Steuerungsstrate-

gien mit einem globalen Lastpendelausgleich bewirkt bereits eine geringe Verlagerung des gesamten Verzögerungsintervalls von $\pm 0,1$ s gegenüber den berechneten Schaltzeitpunkten eine deutlich größere maximale Auslenkung des LAM. Dabei wächst die Auslenkung des LAM bei der Anwendung von *Strategie 5* und *6* annähernd linear mit zunehmendem Abstand des Verzögerungsintervalls von dem berechneten Verzögerungsbeginn.

Die Untersuchung der Auswirkung einer Verlagerung der Schaltzeiten über $\pm 0,1$ s hinaus ist nicht sinnvoll, da die maximalen Auslenkungen bereits bei einer Verlagerung von $\pm 0,1$ s nicht akzeptabel sind. Eine Ursache für die geringe Robustheit der Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich gegenüber einer Verlagerung des Verzögerungsverlaufs sind die Auslenkungen nach der Beschleunigungsphase, die im Vergleich zu den Pendelauslenkungen bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich wesentlich größer sind.

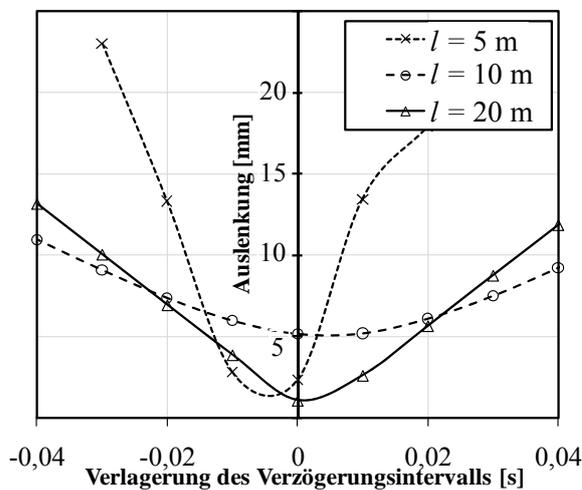


Abb. 6.12 Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 5 und einer max. Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 10$ m/min.

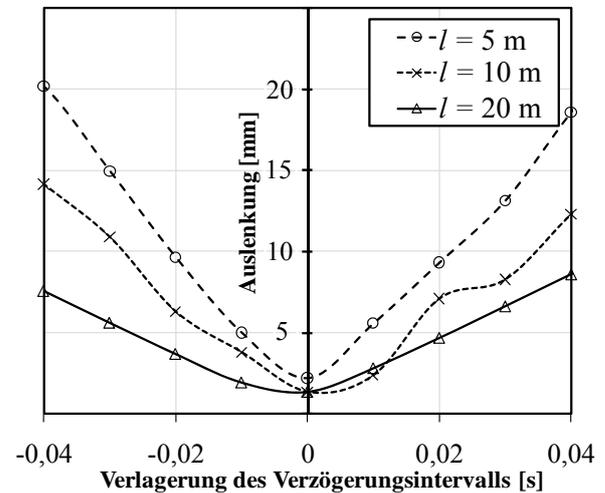


Abb. 6.13 Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 5 und einer max. Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 50$ m/min.

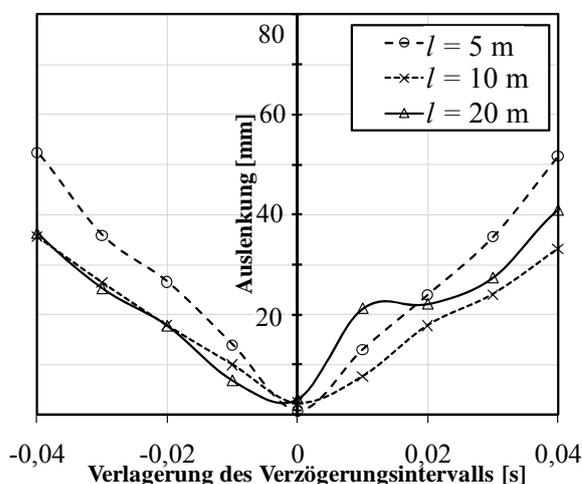


Abb. 6.14

Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 5 und einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 100$ m/min.

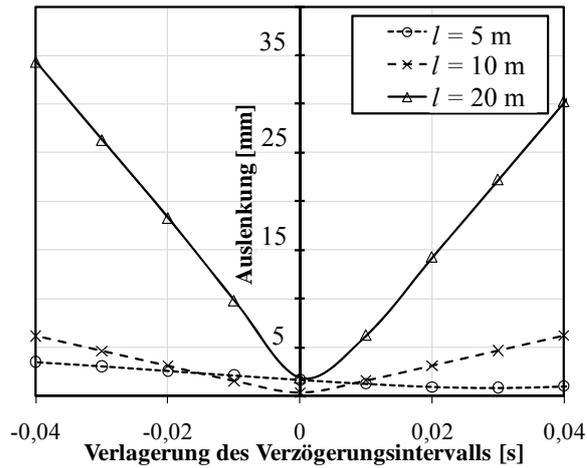


Abb. 6.15 Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 6 und einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 10$ m/min.

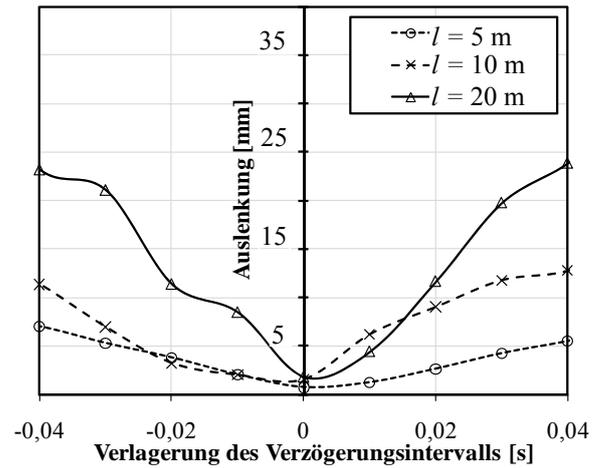


Abb. 6.16 Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 6 und einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 50$ m/min.

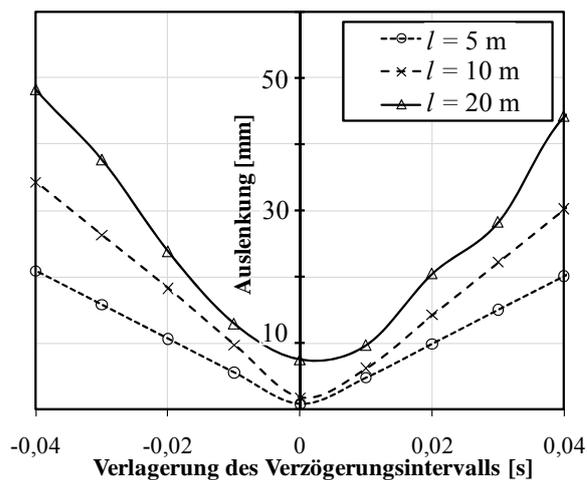


Abb. 6.17 Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 6 und einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 100$ m/min.

6.2 Simulation von Steuerungsstrategien für trapezförmige Tragseilanordnungen mit konstanter Tragseillänge während des Verfahrens

6.2.1 Positionierungszeiten

Die trapezförmige Anordnung der Tragseile ermöglicht eine einfache Lastpendeldämpfung, da bei dieser Tragseilanordnung immer eine horizontale Seilkraftkomponente auf das LAM wirkt. Neben der Lastpendeldämpfung beeinflusst der Tragseilwinkel auch die Periodendauer, die wiederum direkt die Positionierungszeit beeinflusst. Zusätzlich zu dem Tragseilwinkel besitzt die Lage des Massenschwerpunktes einen Einfluss auf die Periodendauer. Zum Vergleich

der Simulationsergebnisse wird bei der Untersuchung der trapezförmigen Tragseilanordnung die Position des LAM unterhalb der Laufkatze entsprechend den Tragseillängen aus den Simulationsversuchen mit paralleler Tragseilanordnung festgelegt.

In der **Abb. 6.18** ist die Periodendauer in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze für unterschiedliche Tragseilwinkel dargestellt. Das Diagramm verdeutlicht, dass die Periodendauer mit einem größer werdenden Tragseilwinkel abnimmt. Bei einem Winkel von 15° reduziert sich die Periodendauer um durchschnittlich 16 % gegenüber der parallelen Tragseilanordnung und der gleichen Position des LAM unterhalb der Laufkatze. Bei einem Seilwinkel von 10° wird im Mittel eine 9 % kleinere Periodendauer erzielt. Eine geringe Vergrößerung des Tragseilwinkels verursacht demgegenüber keine nennenswerte Reduzierung der Periodendauer ($1^\circ = 0,55\%$; $2^\circ = 1,16\%$; $4^\circ = 2,59\%$). Dadurch, dass die Längen der Beschleunigungsintervalle von der Periodendauer abhängig sind, wirkt sich eine Reduzierung der Periodendauer positiv auf die Spielzeiten aus. Je kleiner der Fahranteil mit konstanter Geschwindigkeit ist, desto mehr kann die Spielzeit durch eine trapezförmige Tragseilanordnung verringert werden.

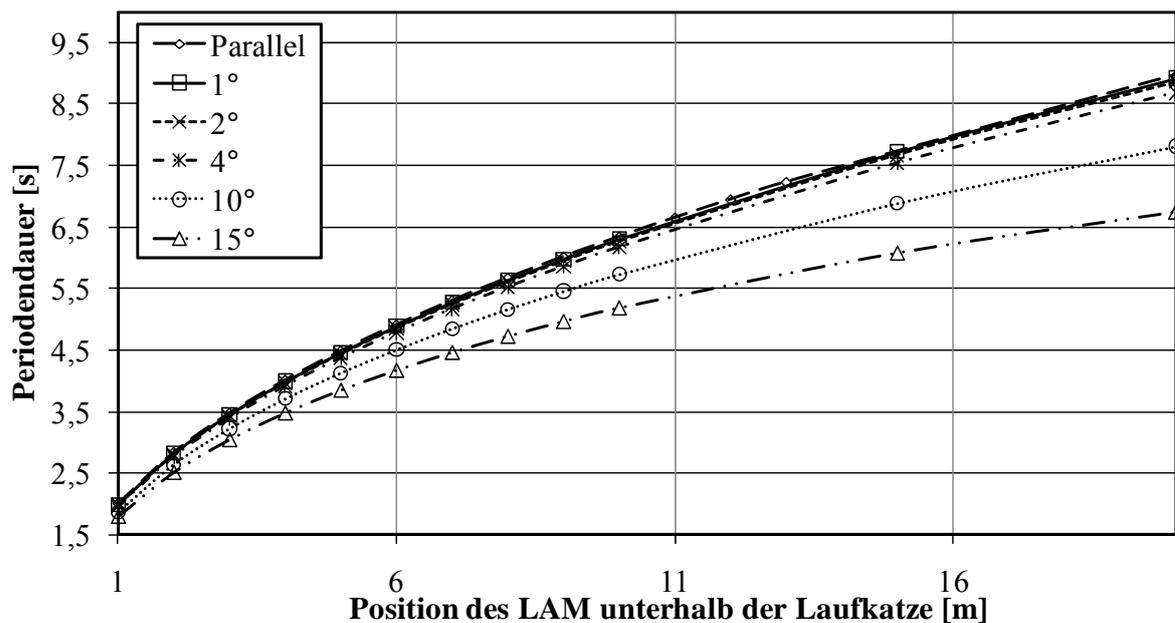


Abb. 6.18 Periodendauer in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze für unterschiedliche Tragseilwinkel und einem Schwerpunktabstand von $e = -0,5$ m.

In dem Diagramm in **Abb. 6.19** ist die Periodendauer für einen Tragseilwinkel von 15° und variierender Lage des Massenschwerpunktes dargestellt. Das Diagramm verdeutlicht, dass mit einem anwachsenden Abstand des Massenschwerpunktes von der Tragseilaufhängung in positiver z -Koordinatenrichtung die Periodendauer abnimmt. Dem gegenüber wird die Periodendauer größer, wenn der Abstand zwischen dem Massenschwerpunkt und der Tragseilaufhängung in negativer z -Koordinatenrichtung zunimmt. Bei einem positiven Schwerpunktabstand von $e = +2,5$ m wird eine durchschnittliche Reduzierung der Periodendauer von 49 % im

Vergleich zu der parallelen Tragseilanordnung erreicht. Dem gegenüber ist die Periodendauer bei einem negativen Schwerpunktabstand von $e = -2,5$ m durchschnittlich doppelt so groß wie die Periodendauer bei der entsprechende parallelen Tragseilanordnung.

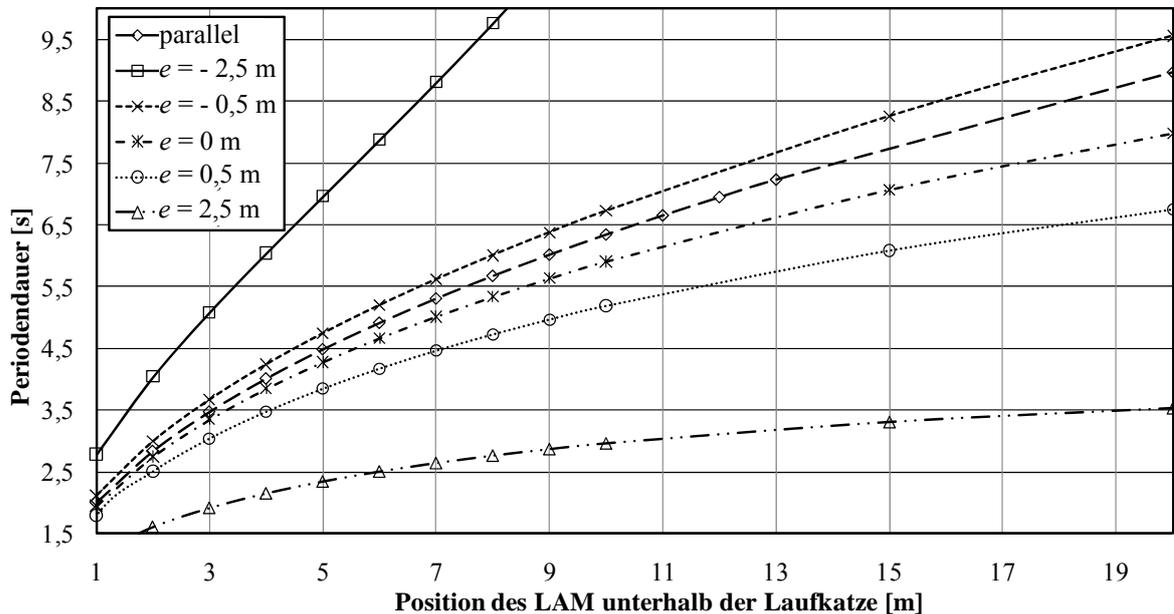


Abb. 6.19 Periodendauer in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze für unterschiedliche Schwerpunktabstände und einem Tragseilwinkel von $\alpha = 15^\circ$.

Die analytische Untersuchung von unterschiedlichen Tragseil- und Schwerpunktanordnungen zeigt, dass die geringste Periodendauer erzielt werden kann, wenn der Massenschwerpunkt und der imaginäre Tragseilschnittpunkt die gleichen Positionen besitzen. Verlagert sich der Massenschwerpunkt von dem Tragseilschnittpunkt, so verlängert sich auch die Periodendauer. In Abhängigkeit davon, in welche Richtung der Massenschwerpunkt verlagert wird, ist die Änderung der Periodendauer unterschiedlich groß. Bei einer Verlagerung des Massenschwerpunktes in negative z -Koordinatenrichtung ist die Verlängerung der Periodendauer bei kleinen Positionsänderungen des Massenschwerpunktes wesentlich größer als bei der gleichen Verlagerung des Massenschwerpunktes in die positive z -Koordinatenrichtung. Die Skizze in **Abb. 6.20** zeigt den qualitativen Verlauf der Periodendauer in Abhängigkeit der Position des Massenschwerpunktes von dem Tragseilschnittpunkt.

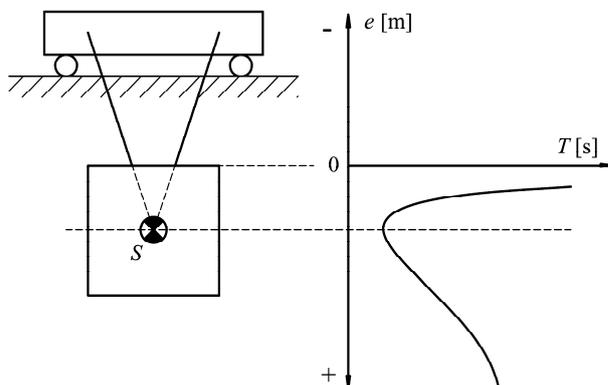


Abb. 6.20

Veränderung der Periodendauer in Abhängigkeit des Abstands zwischen dem Massenschwerpunkt und dem imaginären Seilschnittpunkt.

6.2.2 Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens

Wie bereits in dem vorherigen Kapitel beschrieben wurde, besitzt der Tragseilwinkel einen entscheidenden Einfluss auf das Lastpendeln. Aus diesem Grund muss der Tragseilwinkel neben der Tragseillänge als zusätzlicher Parameter in der Simulation variiert werden. Die Lage des Massenschwerpunkts wird für alle Simulationen mit $e = -0,5$ m festgelegt. Dieser Abstand entsteht aufgrund des vorgesehenen konstruktiven Aufbaus des LAM. Eine Variation der Lage des Massenschwerpunkts wird in der Simulation nicht berücksichtigt, da sich die Lage des Massenschwerpunkts durch die endgültige Konstruktion oder die Beladung des LAM nur geringfügig ändert.

Das Diagramm in **Abb. 6.21** zeigt die maximale Auslenkung des LAM in Abhängigkeit der Position unterhalb der Laufkatze und der Anwendung von unterschiedlichen Steuerungsstrategien. Dabei ist der Tragseilwinkel unabhängig von der Position des LAM unterhalb der Laufkatze konstant. Bei den meisten Simulationen entsteht der maximale Lastpendelausschlag während der Beschleunigung. Die geringsten Auslenkungen können mit der *Strategie 2* erzielt werden (max. 222 mm bei $l = 20$ m und $v_K = 50$ m/min). Dem gegenüber werden die größten Auslenkungen bei den zeitoptimalen Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich verursacht (max. 987 mm bei der *Strategie 6*, $l = 20$ m und $v_K = 50$ m/min). Bei den übrigen Steuerungsstrategien ist erkennbar, dass sich die maximale Auslenkung mit der Anzahl der Schaltintervalle erhöht. Die *Strategie 4* erzeugt demnach die größte Auslenkung. Danach folgt die *Strategie 3* und *1*.

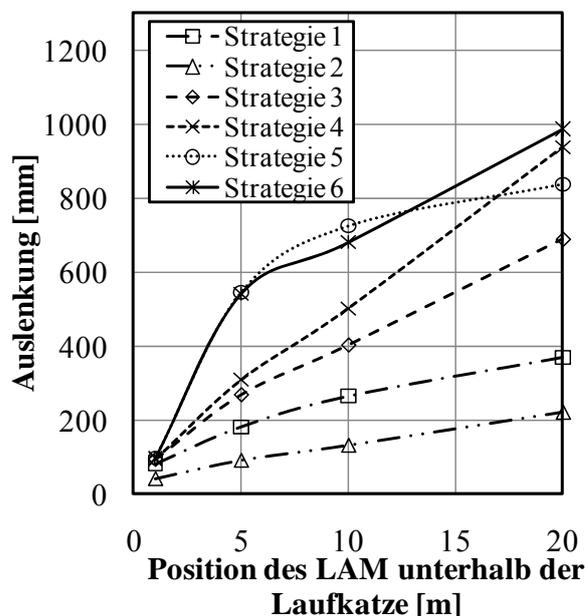


Abb. 6.21 Maximale Auslenkung des LAM während des Verfahrens in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei einem konstanten Tragseilwinkel von $\alpha = 4^\circ$ und $v_K = 50$ m/min

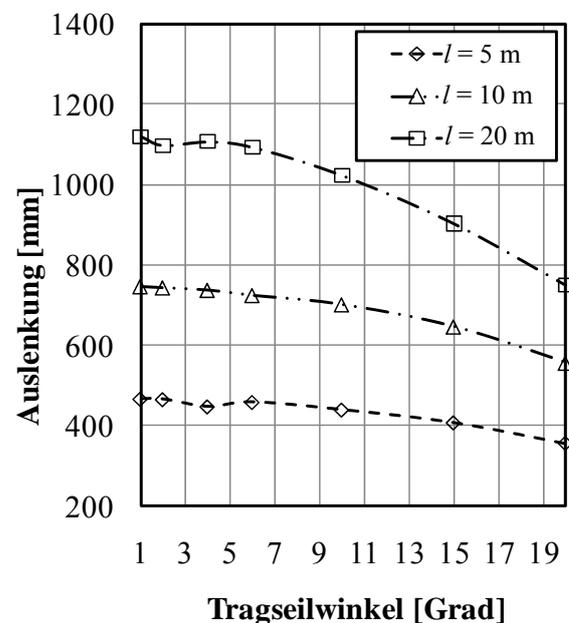


Abb. 6.22 Maximale Auslenkung des LAM während des Verfahrens in Abhängigkeit des Tragseilwinkels, der Anwendung von Strategie 3 und $v_K = 100$ m/min

Neben der Trageillänge besitzt der Trageilwinkel einen entscheidenden Einfluss auf die Pendelauslenkung. In der **Abb. 6.22** ist beispielhaft die maximale Auslenkung während des Verfahrens in Abhängigkeit des Trageilwinkels und bei der Anwendung von *Strategie 3* dargestellt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die maximalen Auslenkungen des LAM mit einem größer werdenden Trageilwinkel in Form einer kubischen Funktion abnehmen. Die Simulationen verdeutlichen insgesamt, dass ein Trageilwinkel unterhalb von 10° nur eine geringe Reduzierung des maximalen Pendelausschlags ermöglicht. Die größte Auswirkung des Pendelwinkels auf die maximale Auslenkung kann bei den zeitoptimalen Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich beobachtet werden. Dem gegenüber wird die maximale Auslenkung des LAM bei der Anwendung der *Strategie 2* am geringsten von einer Änderung des Trageilwinkels beeinflusst.

6.2.3 Maximale Pendelauslenkung nach dem Verfahren unter der Berücksichtigung von kinematischen Toleranzen

Ebenso wie bei der parallelen Trageilanordnung, wird die Auslenkung nach der Positionierung durch eine Verlagerung des Verzögerungsintervalls beeinflusst. Die Simulation wird daher, wie bereits in Kap. 6.1.2 beschrieben ist, durchgeführt. Zur Reduzierung des Aufwands bei der Simulation werden im Folgenden nur Trageilwinkel bis max. 4° betrachtet. Bei größeren Trageilwinkeln wird der Trageilabstand d an der Laufkatze zunehmend breiter. So ist z.B. ab einem Trageilwinkel von 5° und einer Höhe von 20 m der Trageilabstand d an der Laufkatze doppelt so groß wie der Trageilabstand b am LAM. Infolge einer zunehmenden Breite der Laufkatze wird die Wirtschaftlichkeit durch den konstruktiven Aufwand negativ beeinflusst. Eine Realisierung von Trageilwinkeln, die größer als 4° sind, ist daher nicht sinnvoll. In der **Abb. 6.23** sind die Trageilabstände d in Abhängigkeit der Höhe des LAM unterhalb der Laufkatze für unterschiedliche Trageilwinkel dargestellt.

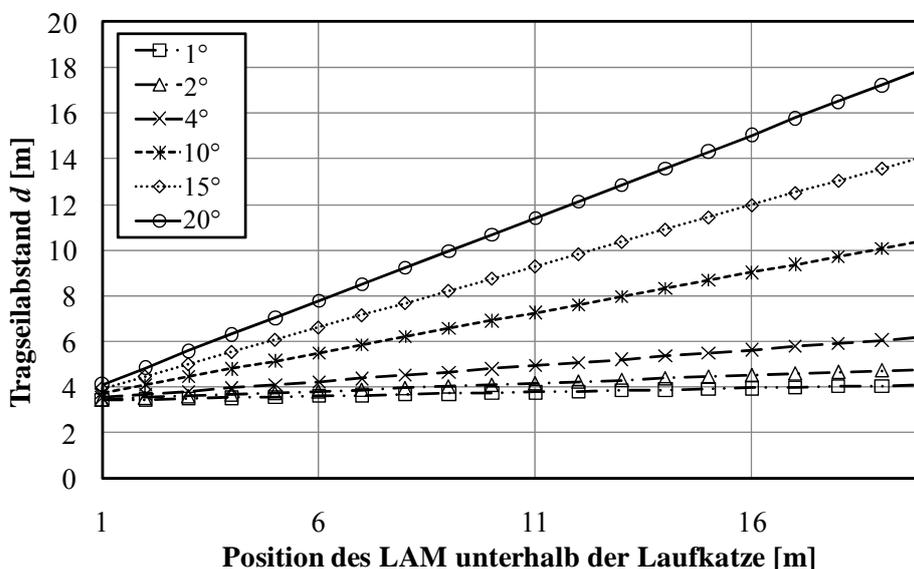


Abb. 6.23
Trageilabstand d in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei unterschiedlichen Trageilwinkeln.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt, dass bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich die maximale Auslenkung des LAM abnimmt, wenn der Abstand zwischen dem LAM und der Laufkatze zunimmt. Eine Vergrößerung des Tragseilwinkels ermöglicht bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich i.d.R. eine Reduzierung der Auslenkung. Bei einem Tragseilwinkel von 2° können im Durchschnitt zwischen 25 % bis 64 % geringere Auslenkung erzielt werden. Die Verdoppelung des Tragseilwinkels auf 4° ermöglicht bei den meisten Simulationsergebnissen keine deutliche Reduzierung der Auslenkung gegenüber einer Tragseilanordnung mit einem Tragseilwinkel von 2° . In der **Abb. 6.24** und **Abb. 6.25** sind beispielhaft die Simulationsergebnisse für die *Strategie 1* und *4* dargestellt.

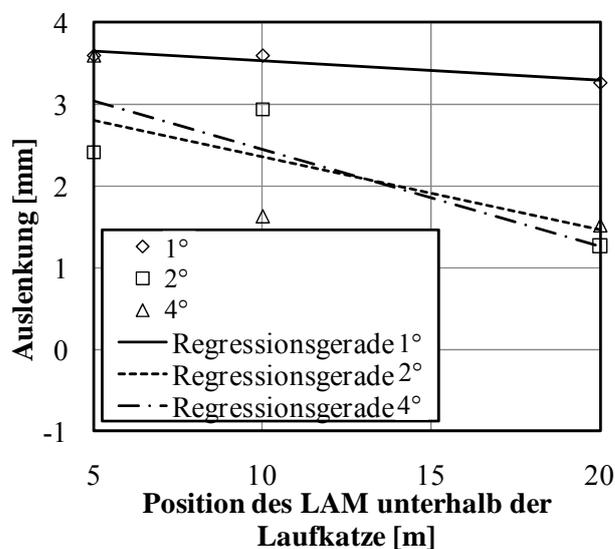


Abb. 6.24 Auslenkung des LAM in Abhängigkeit der Tragseillänge bei unterschiedlichen Tragseilwinkeln, der Anwendung von Strategie 1 und $v_K = 50$ m/min.

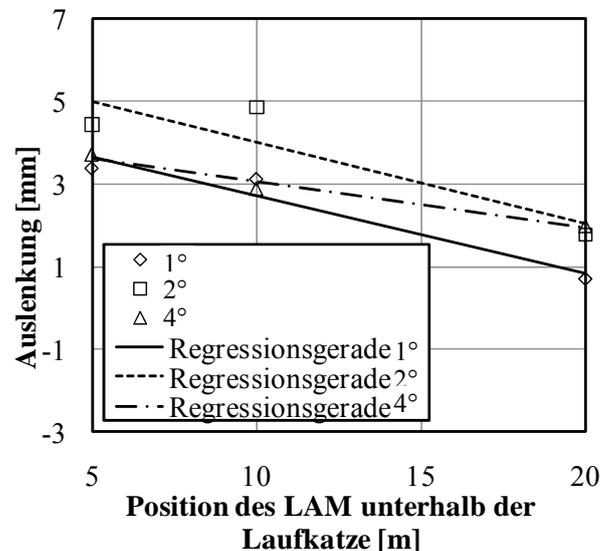


Abb. 6.25 Auslenkung des LAM in Abhängigkeit der Tragseillänge bei unterschiedlichen Tragseilwinkeln, der Anwendung von Strategie 4 und $v_K = 50$ m/min.

Ein Vergleich der Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich untereinander zeigt, dass die *Strategie 2* immer die geringsten Auslenkungen erzeugt. Die Auslenkung bei der *Strategie 2* ist zum Teil um das Hundertfache geringer als die Auslenkung bei den übrigen Steuerungsstrategien. Eine zuverlässige Aussage bezüglich der Rangfolge bei den übrigen Steuerungsstrategien ist nicht möglich, da sich die maximalen Auslenkungen nur geringfügig unterscheiden und sich die Differenzen zwischen den einzelnen Simulationsergebnissen in Abhängigkeit der gewählten Simulationsparameter ändern. Zum Vergleich der Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich sind die Auslenkungen bei unterschiedlichen Tragseilwinkeln und Geschwindigkeiten in den **Abb. 6.26** bis **Abb. 6.29** dargestellt.

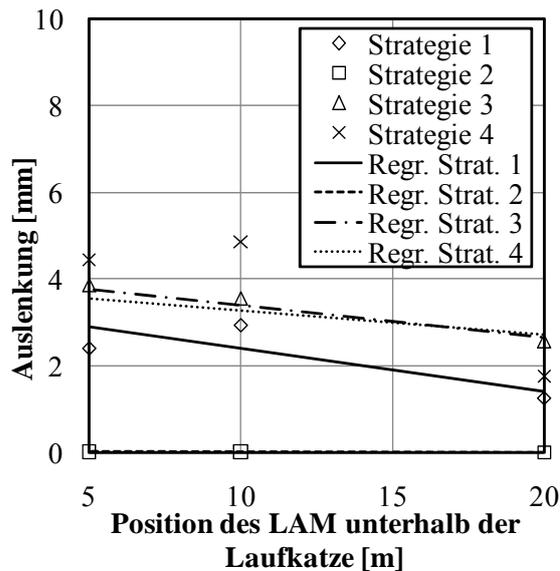


Abb. 6.26 Auslenkung in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei einem konstanten Tragseilwinkel von 2° und $v_K = 50$ m/min

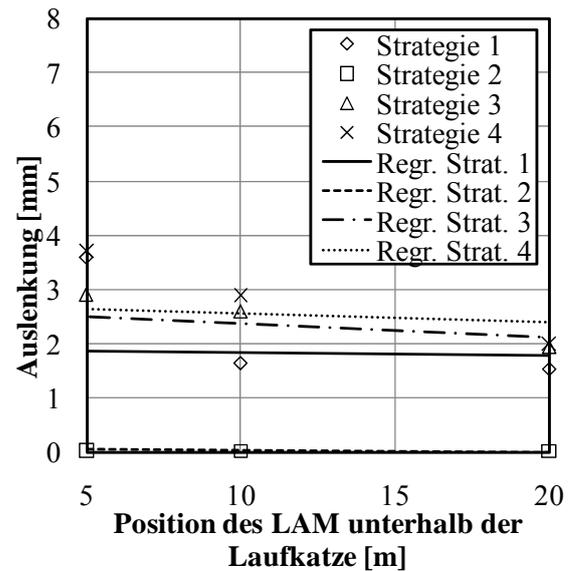


Abb. 6.27 Auslenkung in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei einem konstanten Tragseilwinkel von 4° und $v_K = 50$ m/min

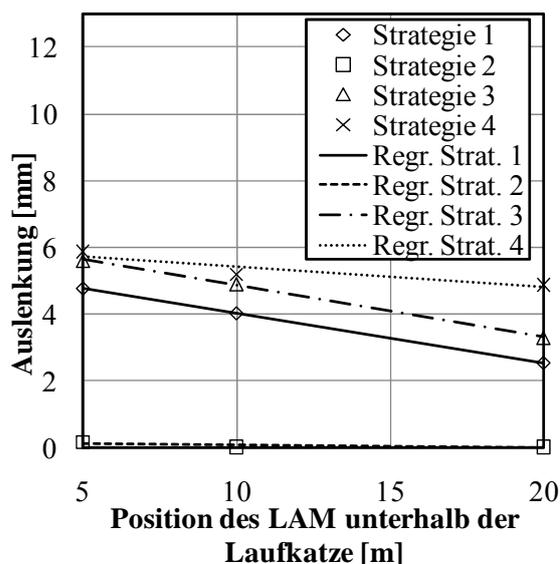


Abb. 6.28 Auslenkung in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei einem konstanten Tragseilwinkel von 2° und $v_K = 100$ m/min

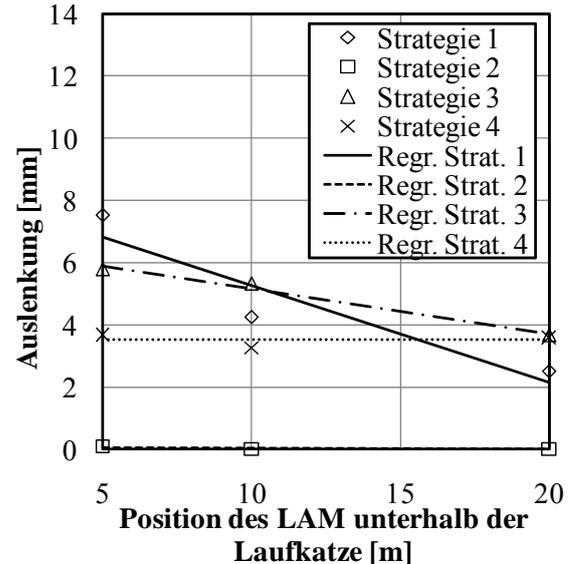


Abb. 6.29 Auslenkung in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei einem konstanten Tragseilwinkel von 4° und $v_K = 100$ m/min

Bei der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich wird das gleiche Verhalten beobachtet wie bei der parallelen Tragseilanordnung. Die Auslenkung steigt linear an, wenn der Abstand des Verzögerungsintervalls von dem berechneten Schaltzeitpunkt abweicht. Für die Simulation wird ausgehend von der minimal erreichbaren Auslenkung das gesamte Verzögerungsintervall um insgesamt 0,05 s in positive und negative Richtung verschoben. Der dabei entstandene maximale Wert der Auslenkung wird bei der Auswertung berücksichtigt.

Insgesamt werden bei allen Simulationsergebnissen deutlich höhere Auslenkungen erzielt als bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Ausgleich des Lastpendelns. Im Durchschnitt sind die Auslenkungen bei den Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich fünfzehnmal größer als die Auslenkungen bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich. Die **Abb. 6.30** und **Abb. 6.31** zeigen beispielhaft den Verlauf der Auslenkung in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze für die zeitoptimalen Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich. Ein direkter Einfluss des Tragseilwinkels auf die Auslenkung ist anhand der Simulationsergebnisse nicht erkennbar, da die Abstände zwischen den jeweiligen Auslenkungen zu gering sind, um eine zuverlässige Aussage zu treffen.

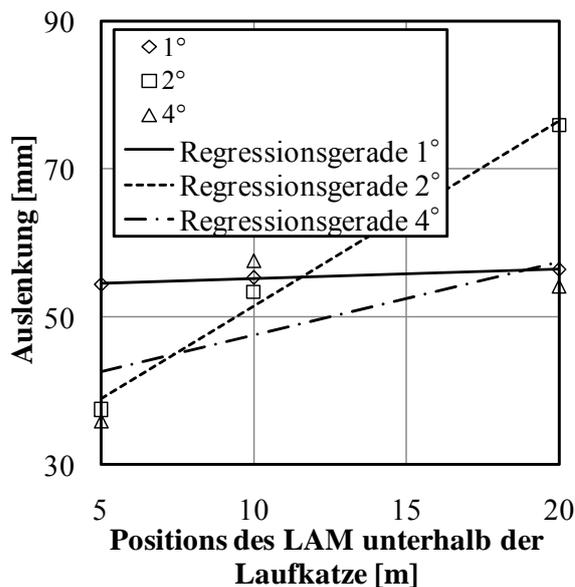


Abb. 6.30 Auslenkung des LAM in Abhängigkeit der Position unterhalb der Laufkatze und der Anwendung von Strategie 5 bei $v_K = 100$ m/min

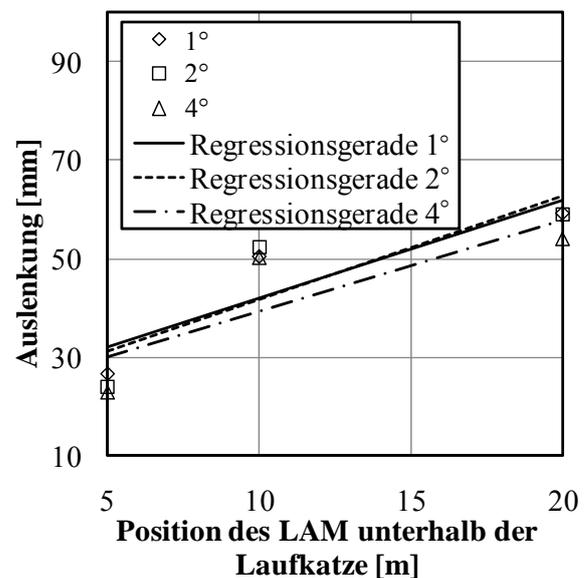


Abb. 6.31 Auslenkung des LAM in Abhängigkeit der Position unterhalb der Laufkatze und der Anwendung von Strategie 6 bei $v_K = 100$ m/min

6.3 Simulation von Steuerungsstrategien mit paralleler Tragseilanordnung und variabler Tragseillänge

Bei einer Änderung der Tragseillänge während der Positionierung ist eine Lastpendeldämpfung mit Hilfe der Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 nur begrenzt möglich. Durch die Änderung der Tragseillänge verändern sich die Länge und die Lage der Beschleunigungsintervalle. Die im Voraus berechneten Beschleunigungsintervalle können auf die veränderliche Periodendauer nicht reagieren. Es entstehen zwangsläufig Abweichungen zwischen den berechneten und den tatsächlich benötigten Schaltzeitpunkten.

Neben einer Änderung der Periodendauer bewirkt die Änderung der Tragseillänge während des Verfahrens der Laufkatze auch eine Anregung oder Dämpfung der Pendelschwingung. Durch den Hub der Last und die daraus resultierende Verringerung der Tragseillänge entsteht eine Anregung des Lastpendelns. Dem gegenüber werden beim Senken der Last die Pendelschwingungen während dem Verfahren gedämpft. Das Diagramm in **Abb. 6.32** zeigt, wie sich das Heben und Senken der Last während dem Verfahren der Laufkatze auf die Pendelschwingungen auswirkt.

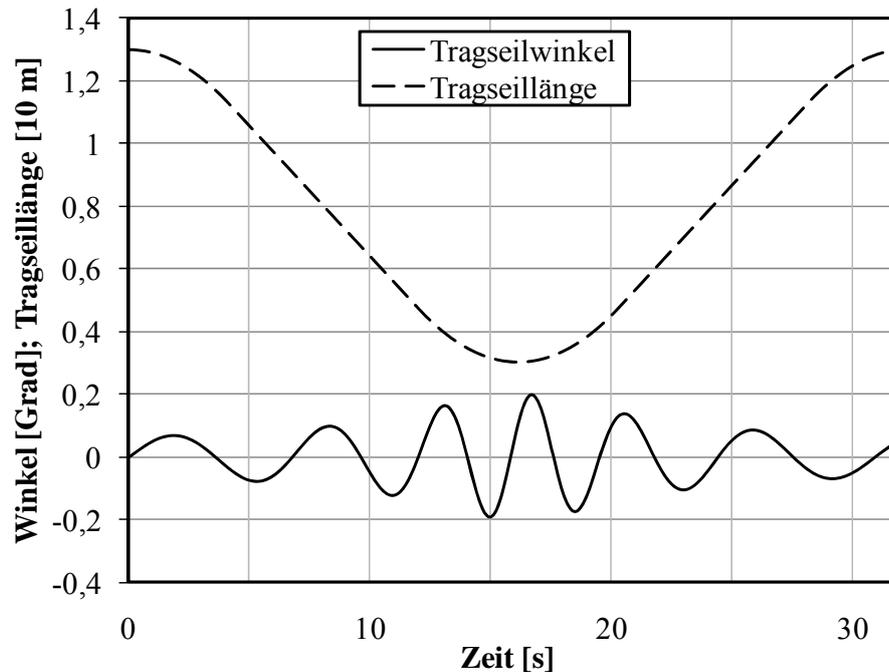


Abb. 6.32 Schwingungsdämpfung und -anregung infolge des Hebens oder Senkens der Last.

Damit ein Vergleich der Steuerungsstrategien untereinander möglich ist, müssen bei den Simulationen immer die gleichen Hub- und Senkbewegungen angewendet werden. Zur Untersuchung der Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich sind daher die Verzögerungsintervalle der Laufkatze so angeordnet, dass der Beginn der Verzögerung mit einem Nulldurchgang der Pendelschwingung zusammenfällt und der gesamte Positionierungsvorgang möglichst gleichzeitig mit dem Ende der Hubbewegung abgeschlossen ist. Durch dieses zeitlich synchrone Verfahren in horizontaler und vertikaler Richtung werden i.Allg. die kürzesten Spielzeiten ermöglicht. Nur bei der Anwendung von *Strategie 2* kann der beschriebene Bewegungsablauf nicht realisiert werden, da die Beschleunigungs- und Verzögerungsintervalle zu lange andauern.

In den Simulationsuntersuchungen werden Änderungen der Tragseillänge von 5, 10 und 19 m bei dem Heben und Senken der Last angewendet. Die Hubbewegungen mit einer Änderung der Tragseillänge von 5 m und 10 m beginnen dabei mit einer Tragseillänge von 13 m beim Heben und 3 m beim Senken. Bei einer Änderung der Tragseillänge von 19 m wird der Hubvorgang mit einer Tragseillänge von 22 m gestartet und das Senken der Last mit einer Tragseillänge von 3 m. Neben den unterschiedlichen Änderungen der Tragseillänge werden die

Beschleunigungen und Verzögerungen bei den Hub- und Senkbewegungen mit einer Änderung der Tragseillänge von 10 m zwischen $0,1$ bis $0,3 \text{ m/s}^2$ variiert. Bei den Hub- und Senkvorgängen mit den Seillängenänderungen von 5 und 19 m beträgt die Beschleunigung und Verzögerung $0,2 \text{ m/s}^2$. Für die Untersuchung der Auswirkung des Input-Shaping wird ein Hub- und Senkvorgang mit einer Änderung der Tragseillänge von jeweils 10 m, einer Hubgeschwindigkeit von 50 m/min und einer Hub- bzw. Senkbeschleunigung von $0,2 \text{ m/s}^2$ eingesetzt.

6.3.1 Positionierungszeit

Die Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 ohne die Berücksichtigung einer veränderlichen Tragseillänge hat keinen Einfluss auf die Positionierungszeiten bei einem Verfahren der Laufkatze und gleichzeitigem Heben oder Senken der Last. Erst durch die Modifikation der Steuerungsstrategien zur Anpassung an eine veränderliche Tragseillänge können länger oder kürzer andauernde Positionierungszeiten entstehen. Die Verkürzung oder Verlängerung der Positionierungszeiten resultiert dabei vor allem aus der Änderung der Periodendauer.

Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen mit konstanter Tragseillänge reduziert sich die Fahrzeit in x -Koordinatenrichtung beim gleichzeitigen Heben der Last, wenn die Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 mit dem Mittelwert der Tragseillänge berechnet werden. Dem gegenüber vergrößert sich die Fahrzeit in x -Koordinatenrichtung bei dem Verfahren der Laufkatze und einem gleichzeitigen Senken der Last, wenn die Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Tragseillänge berechnet werden.

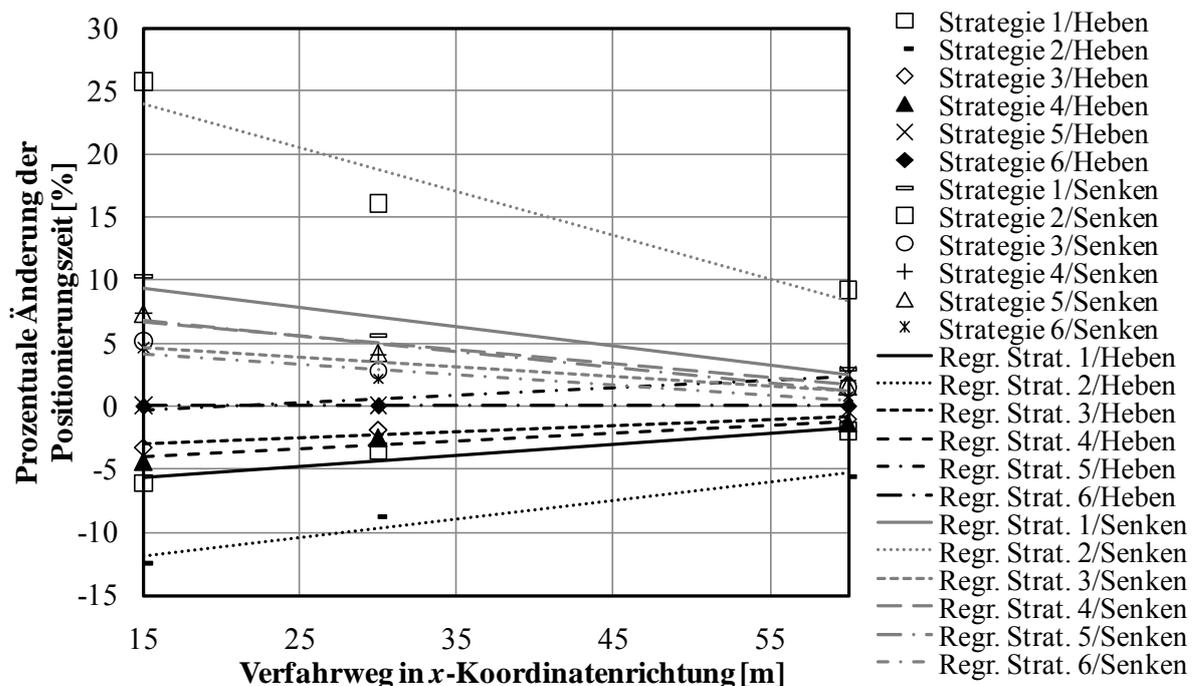


Abb. 6.33 Prozentuale Änderung der Positionierungszeiten beim Verfahren der Laufkatze und gleichzeitigem Heben und Senken der Last im Vergleich zu der Positionierung mit konstanter Tragseillänge.

In dem Diagramm in **Abb.6.33** sind die prozentualen Veränderungen der Fahrzeiten in Abhängigkeit des Fahrwegs beim gleichzeitigen Heben und Senken der Last dargestellt. Durch die Berechnung der Steuerungsstrategien mit dem Mittelwert der Tragseillänge wird der Fahrabschnitt mit konstanter Geschwindigkeit nicht direkt beeinflusst, weshalb bei den meisten Fahrvorgängen nur geringe Änderungen bei den Positionierungszeiten gegenüber den Simulationsergebnissen mit konstanter Tragseillänge zu beobachten sind. Darüber hinaus reduziert sich die prozentuale Änderung der Positionierungszeit mit einem zunehmenden Fahrweg, da der Anteil des Beschleunigungs- und Verzögerungsintervalls an der gesamten Fahrstrecke abnimmt.

Bei dem Heben der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien, die mit dem Mittelwert der Tragseillänge berechnet werden, entsteht eine maximale Reduzierung der Fahrzeit von 4 %, wenn die Simulationsergebnisse mit der *Strategie 2* nicht berücksichtigt werden. Dem gegenüber wird beim Senken der Last eine Fahrzeit erreicht, die bis zu 7 % größer ist als die Fahrzeit bei einer konstanten Tragseillänge während des Verfahrens.

Die Anpassung der Steuerungsstrategien an eine veränderliche Tragseillänge mit Hilfe der Methode des Input-Shaping besitzt den entscheidenden Nachteil, dass die Positionierungszeiten zwangsläufig erhöht werden. In der **Tab. 6.1** sind die prozentualen Veränderungen der Positionierungszeiten für eine Fahrstrecke von 15 m in x -Koordinatenrichtung und ein gleichzeitiges Heben und Senken der Last dargestellt. Als Grundlage für das Input-Shaping und als Referenz für die Veränderung der Positionierungszeiten dient dabei die *Strategie 1*. Dabei wurden zur Berücksichtigung der veränderlichen Tragseillänge die Schaltzeitpunkte der *Strategie 1* mit dem Mittelwert der Tragseillänge berechnet. Die Simulationen zeigen, dass die geringste Positionierungszeit bei der Anwendung des Input-Shaping erreicht werden kann, wenn die Periodendauer der Tragseilanordnung zum Beginn des Hub- oder Senkvorgangs für die Berechnung des Input-Shaper verwendet wird.

| Input-Shaper | Prozentuale Verlängerung der Positionierungszeiten [%] |
|---|--|
| ZV-Shaper mit $\omega = 0,8 \text{ s}^{-1}$ | 14,85 |
| ZV-Shaper mit $\omega = 2,11 \text{ s}^{-1}$ | 4,51 |
| ZVD-Shaper mit $\omega = 0,8 \text{ s}^{-1}$ | 31,49 |
| ZVD-Shaper mit $\omega = 2,11 \text{ s}^{-1}$ | 10,89 |

Tab. 6.1 Prozentuale Verlängerung der Positionierungszeiten bei der Anwendung des Input-Shaping

6.3.2 Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens

Die maximalen Pendelauslenkungen während des Verfahrens, die bei der Anwendung der Steuerungsstrategien aus Kap. 4.2 und einem gleichzeitigem Heben der Last entstehen, sind in dem Diagramm in **Abb. 6.34** dargestellt. Da die maximale Auslenkung vor allem von der Tragezelllänge zum Beginn des Hubvorgangs sowie von der Dauer und der Intensität der Beschleunigung abhängig ist, sind die maximalen Auslenkungen bei einem Hub von 10 m und 5 m immer gleich. Aus diesem Grund sind in der **Abb. 6.34** die maximalen Auslenkungen während des Verfahrens für zwei Hubvorgänge mit unterschiedlichen Tragezelllängen zum Beginn des Hubvorgangs dargestellt. In der Reihenfolge von *Strategie 2*, *Strategie 1*, *Strategie 3*, *Strategie 4*, *Strategie 5* und *Strategie 6* steigt die maximale Auslenkung des LAM während dem Verfahren und dem gleichzeitigen Heben.

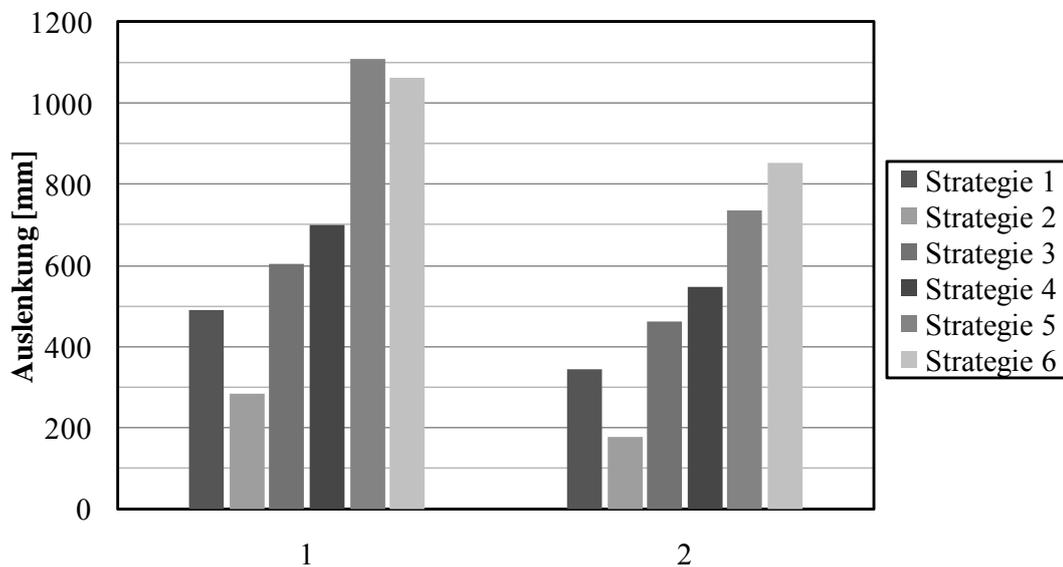


Abb. 6.34 Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens, bei gleichzeitigem Heben der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Tragezelllänge.

1: Hubbewegung von 22 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$

2: Hubbewegung von 10 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$

Bei dem Verfahren der Laufkatze und gleichzeitigem Senken der Last sind die maximalen Auslenkungen während dem Verfahren größer als beim Heben. Die Steuerungsstrategien mit einem globalen Pendelausgleich verursachen um ca. 30 % größere Auslenkungen. Durch den Einsatz von *Strategie 6* werden maximale Auslenkungen während dem Verfahren hervorgerufen, die um 12 % größer sind als die Auslenkungen bei dem Heben. Alleine die Simulationsergebnisse mit der *Strategie 5* erzeugt Auslenkungen, die um 45 % geringer sind. Unabhängig von der Hub- oder Senkbewegung können die geringsten Auslenkungen immer mit der *Strategie 2* erreicht werden.

Die Simulationsergebnisse für die maximale Auslenkung während dem Verfahren bei einem Lasthub von 10 m, einer Hubbeschleunigung von $0,2 \text{ m/s}^2$ und der Anwendung des Input-

Shaping sind in dem Diagramm in **Abb. 6.35** dargestellt. Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen, bei denen die Berechnung der Steuerungsstrategien mit separaten Mittelwerten für die Beschleunigung und Verzögerung erfolgt (s. 1 in **Abb. 6.34**), kann durch die Anwendung des Input-Shaping eine durchschnittliche Reduzierung der Auslenkung von 32 % erreicht werden. Die Auslenkungen bei der Anwendung des Input-Shaping und einem gleichzeitigen Senken der Last während dem Verfahren sind um durchschnittlich 28 % größer als die Auslenkungen beim Heben.

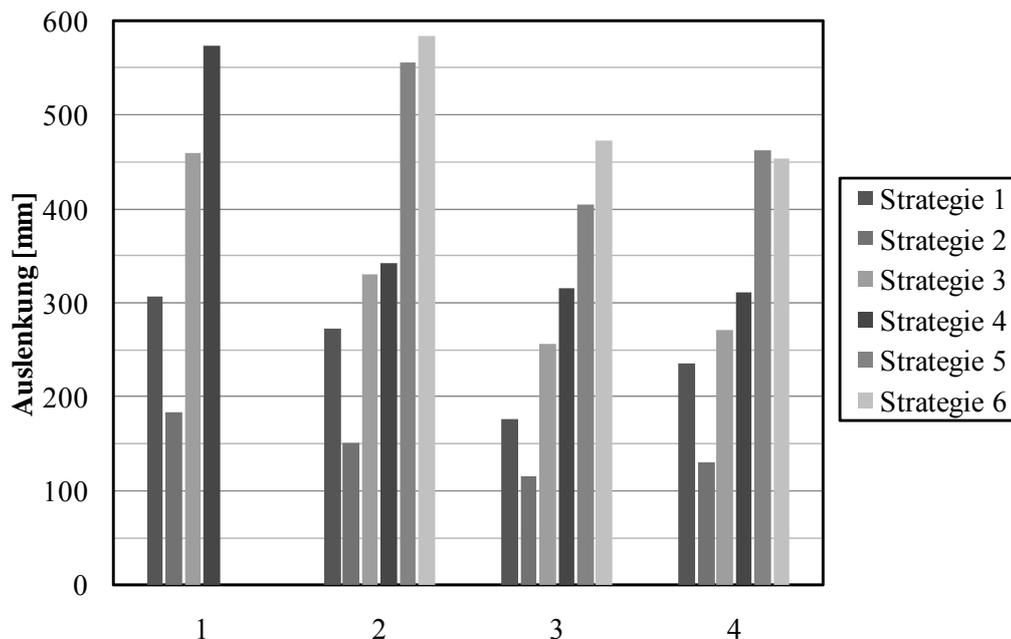


Abb. 6.35 Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens und Heben der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Lasthub: 10 m; $v_H = 50$ m/min; $a_H = 0,2$ m/s²).

- 1: Berechnung mit separaten Mittelwerten für die Beschleunigung und Verzögerung
- 2: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 2,1$ s⁻¹
- 3: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹
- 4: Anwendung eines ZVD-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹

6.3.3 Maximale Pendelauslenkung nach dem Verfahren unter der Berücksichtigung kinematischer Toleranzen

Zur Beurteilung der maximalen Pendelauslenkung nach dem Verfahren müssen zunächst die Auslenkungen ermittelt werden, die bei der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und einer Änderung der Tragseillänge während des Verfahrens entstehen. Da die Änderung der Tragseillänge kinematische Toleranzabweichungen hervorruft, werden die Schaltzeitpunkte in der Simulation nicht weiter beeinflusst. In dem Diagramm in **Abb. 6.36** sind die Simulationsergebnisse zur Ermittlung der maximalen Auslenkungen nach dem Verfahren und einem gleichzeitigen Heben der Last dargestellt. Die Simulationen zeigen, dass die Auslenkungen nach der Positionierung bis zu 1217 mm betragen können. Dabei werden bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich die größten Auslenkungen mit der *Strategie 4* erzielt. Bei den Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelaus-

gleich entstehen die größten Auslenkungen vor allem bei der Anwendung von *Strategie 6*. Ein signifikanter Einfluss der Hubdauer oder der Hubbeschleunigung auf die Auslenkung ist anhand der Simulationsergebnisse nicht erkennbar. Insgesamt verdeutlichen die Simulationsergebnisse, dass der Einsatz von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 ohne jegliche Anpassung an eine veränderliche Trageillänge während dem Verfahren nur bedingt möglich ist.

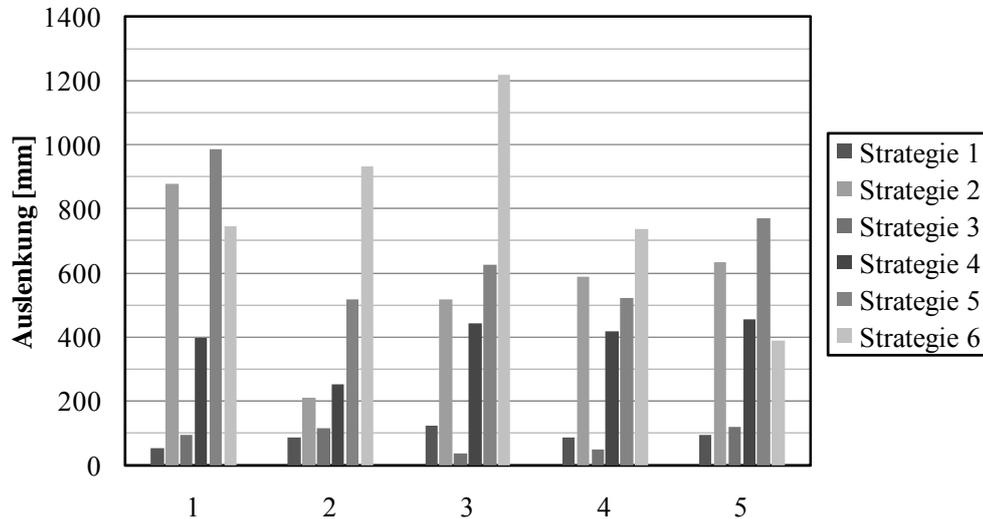


Abb. 6.36 Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Heben der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 ohne Anpassung an eine veränderliche Trageillänge.

- 1: Hubbewegung von 22 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 2: Hubbewegung von 13 m auf 8 m; $v_H = 20 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 3: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,3 \text{ m/s}^2$
- 4: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 5: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,1 \text{ m/s}^2$

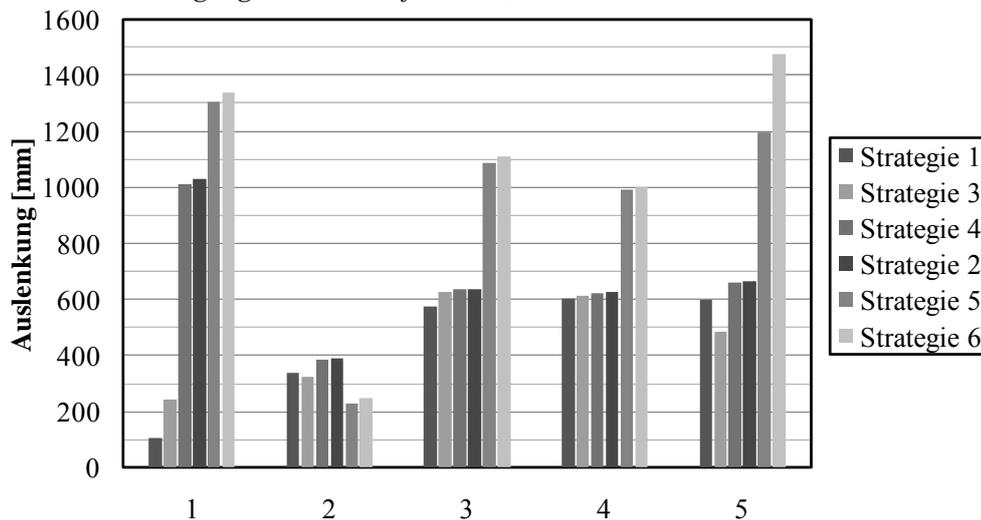


Abb. 6.37 Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Senken der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 ohne Anpassung an eine veränderliche Trageillänge.

- 1: Senkbewegung von 22 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 2: Senkbewegung von 13 m auf 8 m; $v_S = 20 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 3: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,3 \text{ m/s}^2$
- 4: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 5: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,1 \text{ m/s}^2$

In der **Abb. 6.37** sind die maximalen Auslenkungen nach der Positionierung bei einem gleichzeitigen Senken der Last dargestellt. Die Anwendung der Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 verursacht beim Senken der Last wesentlich größere Auslenkungen als die Simulationen beim Heben (vgl. **Abb. 6.36**). Die größte Auslenkung beträgt 1478 mm. Bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich kann eine durchschnittliche Auslenkung von ca. 600 mm gemessen werden. Die durchschnittliche Auslenkung bei den Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich beträgt 1000 mm.

Zur Anpassung der Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 an eine veränderliche Trageillänge während des Verfahrens werden unterschiedliche Varianten in Kap. 4.2 beschrieben. Die einfachste Möglichkeit zur Kompensation der Längenänderung des Trageils ist die Berechnung der Schaltintervalle mit dem Mittelwert der Trageillänge. Um herauszufinden, welche Methode der Mittelwertbildung am geeignetsten dazu ist, wurden die Steuerungsstrategien mit Mittelwerten berechnet und simuliert, die durch unterschiedliche Methoden und Berechnungsvorschriften ermittelt worden sind. Als Ergebnis dieser Untersuchung kann festgestellt werden, dass die Art der Mittelwertbildung bei den betrachteten Hub- und Senkzeiten nur einen geringen Einfluss hat. Erst bei Hub- und Senkzeiten, die länger als 25 s andauern, besitzt die Methode der Mittelwertbildung einen erkennbaren Einfluss. Darüber hinaus zeigen die Untersuchungen, dass die Pendelauslenkungen bei Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich weiter reduziert werden können, wenn die Beschleunigungs- und Verzögerungsintervalle mit getrennt voneinander bestimmten Mittelwerten der Trageillänge berechnet werden.

Für die Untersuchung der Auswirkung einer Modifikation der Steuerungsstrategien zur Anpassung an eine veränderliche Trageillänge wird der Mittelwert der Trageillänge unter der Annahme bestimmt, dass sich die Länge des Trageils linear ändert und die gemittelte Trageillänge der Trageillänge zur halben Hub- bzw. Senkzeit entspricht. In der **Abb. 6.38** sind die Simulationsergebnisse für das Heben der Last dargestellt. Die Untersuchungen zeigen, dass durch die Berechnung der Beschleunigungsintervalle mit einem Mittelwert der Trageillänge die Pendelauslenkungen bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich um 11 bis 57 % geringer sind als die Pendelauslenkung, die bei der Simulation der Steuerungsstrategien ohne eine Kompensation entstehen. Die einzige Ausnahme davon entsteht bei der *Strategie 1*. Bei den Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich können Reduzierungen bei den Auslenkungen von 36 % (*Strategie 5*) bis 67 % (*Strategie 6*) erzielt werden.

Die maximalen Auslenkungen nach dem Verfahren, bei einem gleichzeitigen Senken der Last, sind in dem Diagramm in **Abb. 6.39** dargestellt. Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen, die in **Abb. 6.38** dargestellt sind, entstehen bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich bis zu 42 % geringere Auslenkungen. Bei den Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich werden bis zu 21 % geringere Auslenkungen erzielt, wenn die Schaltzeitpunkte auf der Grundlage des Mittelwerts der Trageillänge berechnet werden.

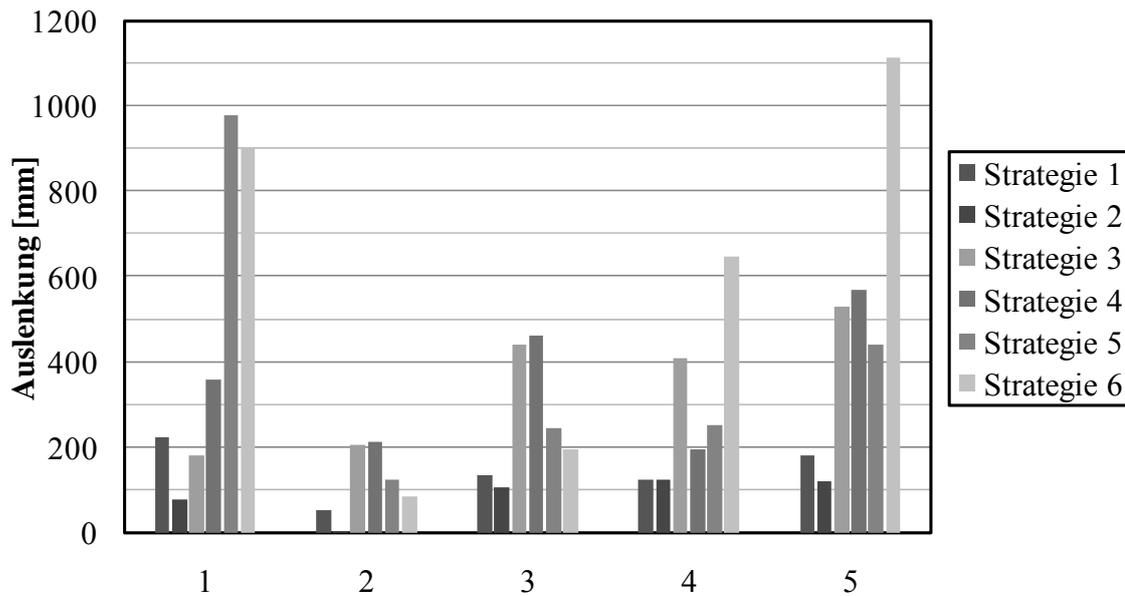


Abb. 6.38 Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Heben der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Trageillänge.

- 1: Hubbewegung von 22 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 2: Hubbewegung von 13 m auf 8 m; $v_H = 20 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 3: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,3 \text{ m/s}^2$
- 4: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 5: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,1 \text{ m/s}^2$

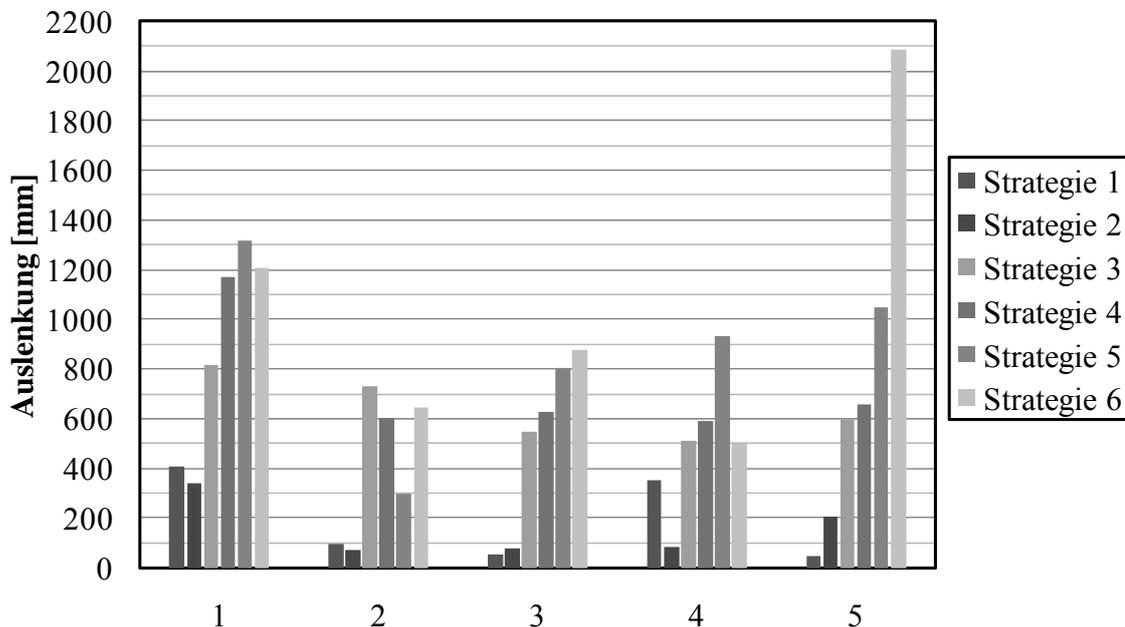


Abb. 6.39 Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Senken der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Trageillänge.

- 1: Senkbewegung von 22 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 2: Senkbewegung von 13 m auf 8 m; $v_S = 20 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 3: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,3 \text{ m/s}^2$
- 4: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 5: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,1 \text{ m/s}^2$

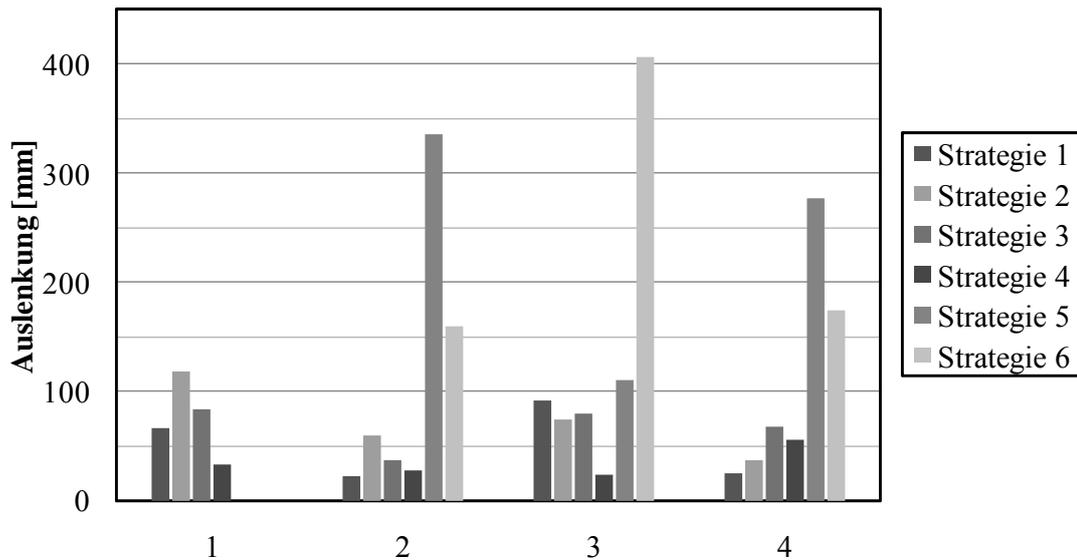


Abb. 6.40 Pendelauslenkung nach dem Verfahren und Heben der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Lasthub: 10 m; $v = 50$ m/min; $a_H = 0,2$ m/s²).

- 1: Berechnung mit separaten Mittelwerten für die Beschleunigung und Verzögerung
- 2: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 2,1$ s⁻¹
- 3: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹
- 4: Anwendung eines ZVD-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹

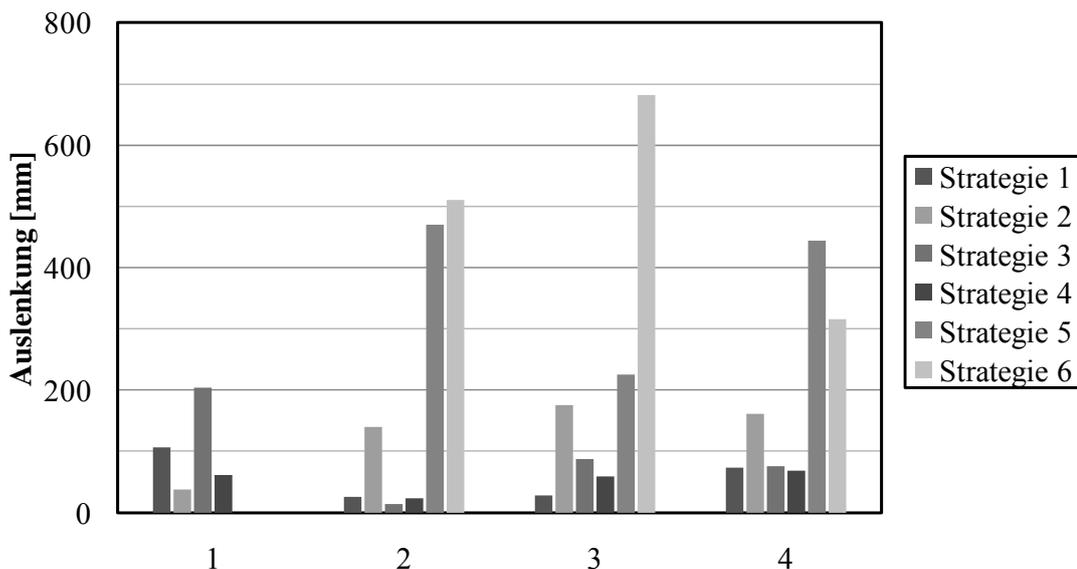


Abb. 6.41 Pendelauslenkung nach dem Verfahren und Senken der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Senkbewegung = 10 m; $v_S = 50$ m/min; $a_S = 0,2$ m/s²).

- 1: Berechnung mit separaten Mittelwerten für die Beschleunigung und Verzögerung
- 2: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 2,1$ s⁻¹
- 3: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹
- 4: Anwendung eines ZVD-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹

Das Diagramm in **Abb. 6.40** zeigt die Auslenkungen nach der Positionierung, die bei der Anwendung der Methode des Input-Shaping und dem Heben der Last entstehen. Die geringsten Auslenkungen können bei dem Heben und Senken der Last mit dem Einsatz eines ZV-Shaper erreicht werden, der mit einer Kreisfrequenz von 2,11 s berechnet wird. Im Vergleich zu den

Simulationsergebnissen, bei denen zur Kompensation der Tragseillängenänderung die Berechnung der Steuerungsstrategien mit dem Mittelwert der Tragseillänge durchgeführt wird, zeigen die Simulationen, dass mit Hilfe des Input-Shaping die Pendelauslenkungen bis zu 58 % (Ausnahme *Strategie 5*) reduziert werden können. Bei der Senkbewegung werden vergleichbare Ergebnisse mit der Anwendung des Input-Shaping erreicht (s. **Abb. 6.41**). Die Pendelauslenkung kann dabei um durchschnittlich 65 % reduziert werden.

6.4 Simulation von Steuerungsstrategien für trapezförmige Tragseilanordnungen mit variabler Tragseillänge während des Verfahrens

Für die Untersuchung des Einflusses einer veränderlichen Tragseillänge bei der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einer trapezförmigen Tragseilanordnung sind die gleichen Randbedingungen und Simulationsparameter gültig wie bei den Simulationsexperimenten mit paralleler Tragseilanordnung und veränderlicher Tragseillänge. Der Tragseilwinkel ist bei allen Simulationsexperimenten so eingestellt, dass zum Beginn des Hubvorganges und zum Ende des Senkvorgangs ein Winkel von 4° zwischen dem Tragseil und dem LAM vorhanden ist. Eine Variation des Tragseilwinkels ist nicht notwendig, da die Simulationsergebnisse aus Kap. 6.2.2 und Voruntersuchungen gezeigt haben, dass mit größeren Tragseilwinkeln zu Beginn des Hubvorgangs und zum Ende des Senkvorgangs keine Reduzierungen des Lastpendels gegenüber den Versuchen mit einem Tragseilwinkel von 4° möglich sind.

6.4.1 Positionierungszeit

Die Positionierungszeiten bei einem Kran mit trapezförmiger Tragseilanordnung sind geringer als bei einem Kran mit paralleler Tragseilanordnung, da durch die trapezförmige Tragseilanordnung die Periodendauer reduziert wird (vgl. Kap. 6.2). Beim Heben und Senken der Last bewirkt die trapezförmige Tragseilanordnung unterschiedliche Schwingungsdämpfungen und -anregungen. Die Höhe der Schwingungsdämpfung und -anregung ist dabei vor allem von dem Tragseilwinkel abhängig.

Die in Kap. 6.3 festgestellte Reduzierung bzw. Erweiterung der Positionierungszeiten beim Heben/Senken der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien, die mit dem Mittelwert der Tragseillänge berechnet werden, ist in der gleichen Größenordnung auch bei der trapezförmigen Tragseilanordnung zu erwarten, da die Positionierungszeiten nur von den berechneten Beschleunigungsintervallen abhängig sind. Aus dem genannten Grund sind weitergehende Untersuchungen zu den Positionierungszeiten bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung mit gleichzeitiger Änderung der Tragseillänge nicht notwendig. Das Gleiche gilt für

die Anwendung des Input-Shaping. Da der Dämpfungsfaktor sich beim Heben und Senken nur geringfügig ändert und nur einen geringen Einfluss auf die zeitliche Verlagerung der Schaltintervalle besitzt (vgl. Gl. 4.28 od. 4.29), ist eine Untersuchung der Positionierungszeiten bei der Anwendung des Input-Shaping nicht notwendig.

6.4.2 Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens

Die maximalen Pendelauslenkungen, die bei dem Heben der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien entstehen, deren Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Trageillänge berechnet werden, sind in der **Abb. 6.42** dargestellt. Im Durchschnitt wird bei den Simulationsergebnissen eine maximale Pendelauslenkung von ca. 600 mm erreicht. Ein Vergleich mit den Simulationsergebnissen für eine parallele Trageilanordnung ergibt, dass die durchschnittlichen Auslenkungen bei der trapezförmigen Trageilanordnung um 3 % geringer sind. Bei dem Senken der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien, die mit dem Mittelwert der Trageillänge berechnet werden, entsteht eine durchschnittliche maximale Auslenkung während des Verfahrens, die um 21 % größer ist als die durchschnittliche Auslenkung bei dem Heben.

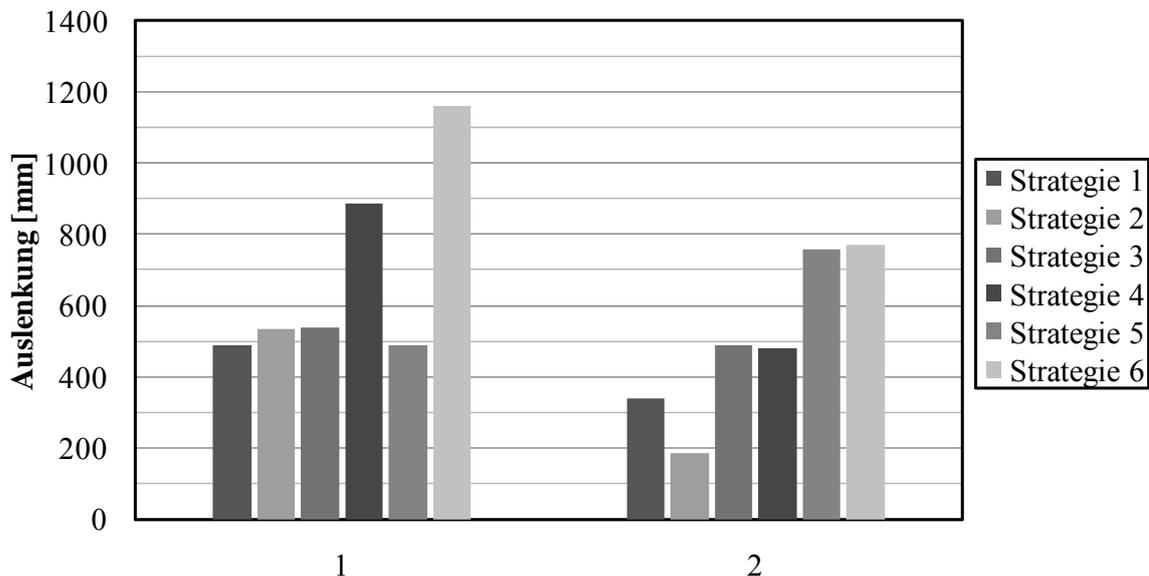


Abb. 6.42 Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens, bei gleichzeitigem Heben der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Trageillänge.

1: Hubbewegung von 22 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$

2: Hubbewegung von 10 m

In dem Diagramm in **Abb. 6.43** sind die maximalen Auslenkungen dargestellt, die bei der Anwendung der Methode des Input-Shaping und dem Heben der Last während des Verfahrens entstehen. Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen, bei denen die Berechnung der Steuerungsstrategien mit separaten Mittelwerten für die Beschleunigung und Verzögerung erfolgt (s. Spalte 1 in **Abb. 6.34**), kann durch die Anwendung des Input-Shaping eine durchschnittli-

che Reduzierung der Auslenkung von 41 % erreicht werden. Die Auslenkungen bei der Anwendung des Input-Shaping und einem gleichzeitigen Senken der Last während des Verfahrens sind im Durchschnitt nahezu ebenso groß wie die Auslenkungen beim Heben.

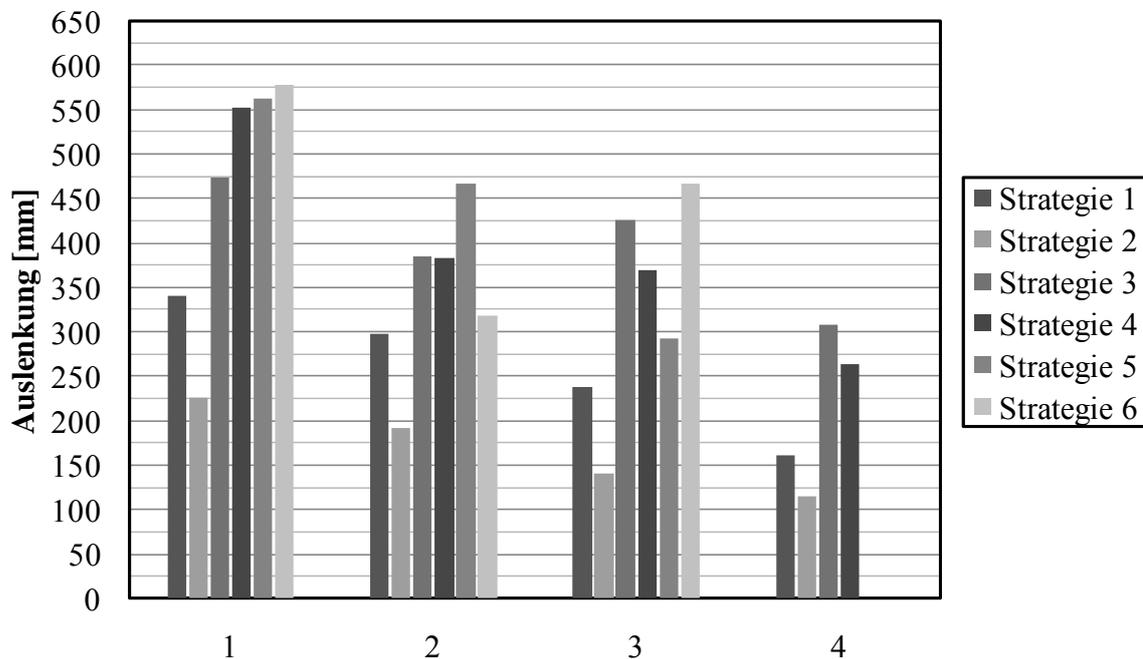


Abb. 6.43 Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens und Heben der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Lasthub: 10 m; $v_H = 50$ m/min; $a_H = 0,2$ m/s²).

- 1: Berechnung mit separaten Mittelwerten für die Beschleunigung und Verzögerung
- 2: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 2,1$ s⁻¹
- 3: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹
- 4: Anwendung eines ZVD-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹

6.4.3 Maximale Pendelauslenkung nach dem Verfahren unter der Berücksichtigung kinematischer Toleranzen

Die maximalen Auslenkungen nach dem Verfahren, die beim Heben der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien ohne Berücksichtigung der Längenänderung des Trageils und einem Trageilwinkel von 4° entstehen, sind in dem Diagramm in **Abb. 6.44** dargestellt. Die größte Auslenkung nach der Positionierung beträgt 1234 mm und wird von der *Strategie 6* verursacht. Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen mit einer parallelen Trageilanordnung und variabler Trageillänge während des Verfahrens können bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich die Pendelauslenkungen um durchschnittlich ca. 27 % reduziert werden. Bei den Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich ist eine Tendenz schwer erkennbar, da die Anwendung der *Strategie 5* eine Reduzierung der Auslenkung von bis zu 28 % ermöglicht und die *Strategie 6* eine Reduzierung von bis zu 39 % gegenüber den Simulationsergebnissen aus **Abb. 6.36**.

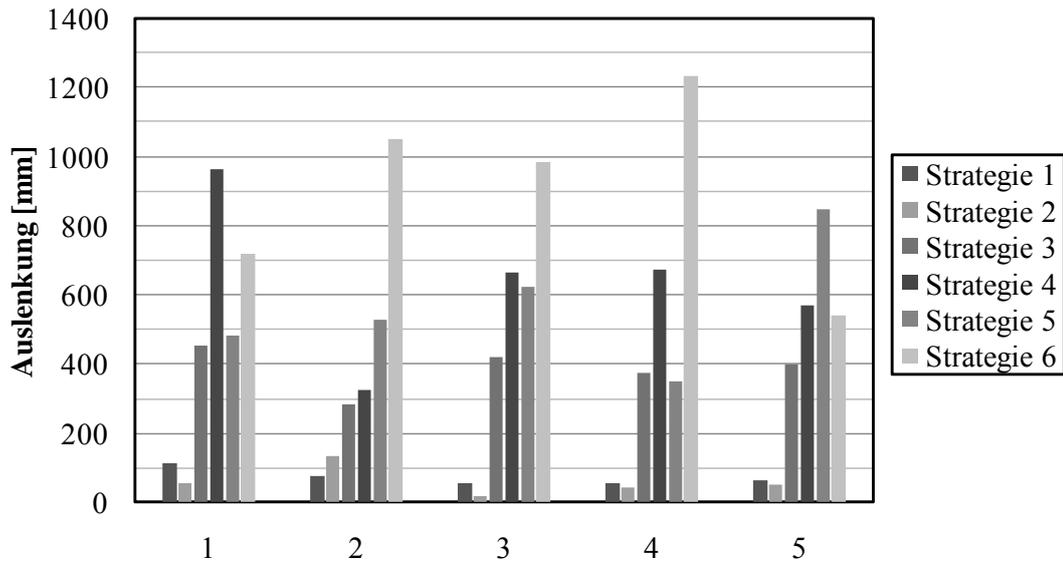


Abb. 6.44 Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Heben der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 ohne Anpassung an eine veränderliche Trageisllänge.

1: Hubbewegung von 22 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$

2: Hubbewegung von 13 m auf 8 m; $v_H = 20 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$

3: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,3 \text{ m/s}^2$

4: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$

5: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,1 \text{ m/s}^2$

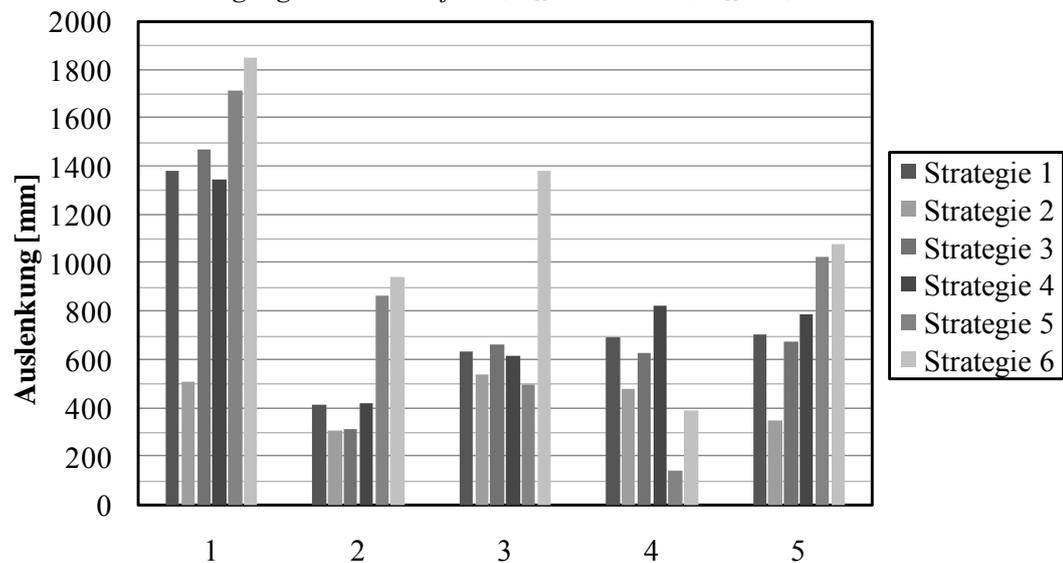


Abb. 6.45 Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Senken der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 ohne Anpassung an eine veränderliche Trageisllänge.

1: Senkbewegung von 22 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$

2: Senkbewegung von 13 m auf 8 m; $v_S = 20 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$

3: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,3 \text{ m/s}^2$

4: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$

5: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,1 \text{ m/s}^2$

In der **Abb. 6.45** sind die maximalen Auslenkungen nach dem Verfahren beim Senken der Last dargestellt. Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen aus **Abb. 6.44** sind die Auslenkungen bei dem Senken der Last und dem Einsatz von Steuerungsstrategien mit einem globa-

len Lastpendelausgleich um durchschnittlich 141 % größer als beim Heben. Die Auslenkungen nach dem Verfahren, die bei der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich entstehen, sind um durchschnittlich 36 % größer als beim Heben.

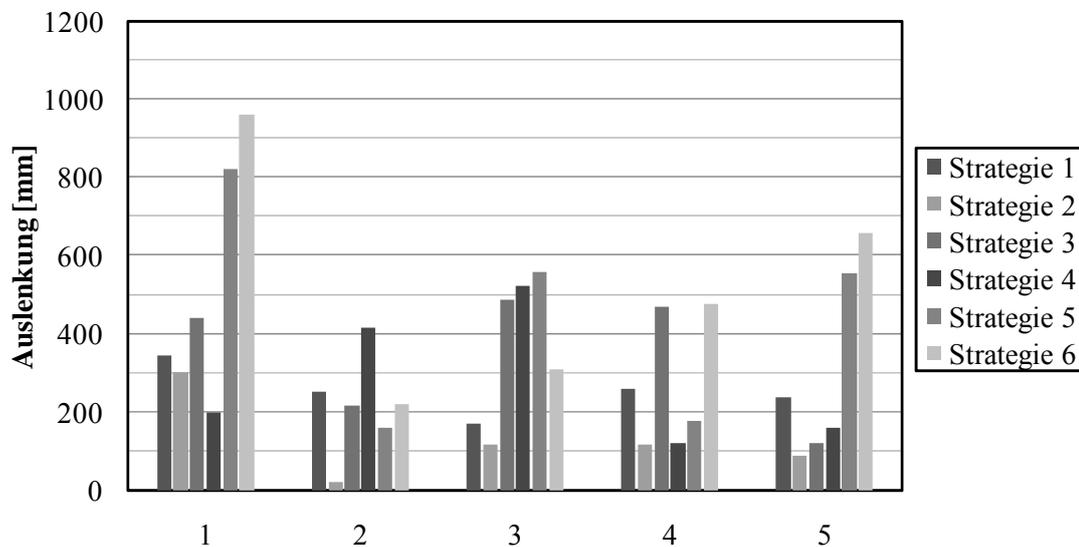


Abb. 6.46 Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Heben der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Tragschillänge.

- 1: Hubbewegung von 22 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 2: Hubbewegung von 13 m auf 8 m; $v_H = 20 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 3: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,3 \text{ m/s}^2$
- 4: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 5: Hubbewegung von 13 m auf 3 m; $v_H = 50 \text{ m/min}$; $a_H = 0,1 \text{ m/s}^2$

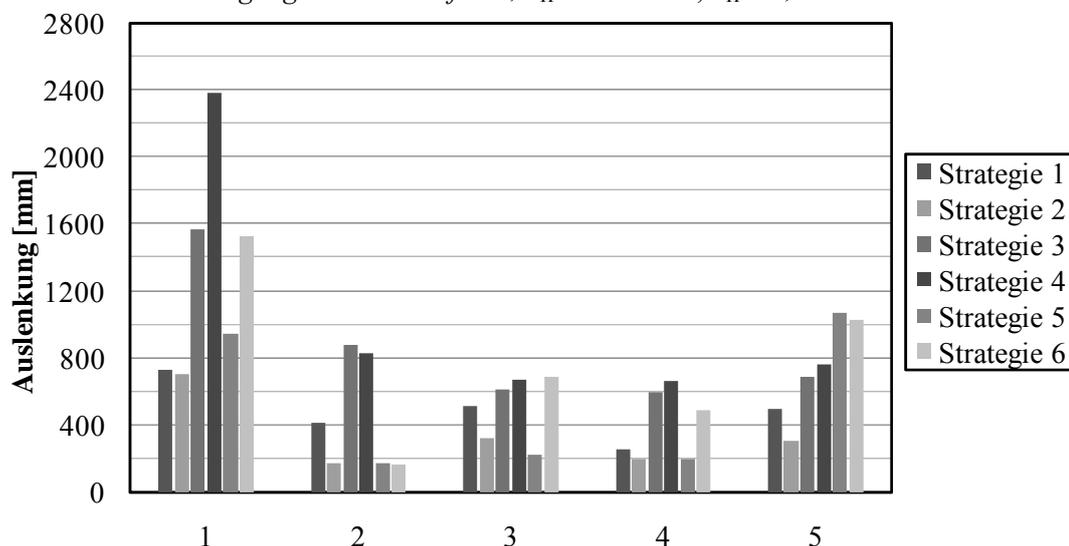


Abb. 6.47 Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Senken der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Tragschillänge.

- 1: Senkbewegung von 22 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 2: Senkbewegung von 13 m auf 8 m; $v_S = 20 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 3: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,3 \text{ m/s}^2$
- 4: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,2 \text{ m/s}^2$
- 5: Senkbewegung von 13 m auf 3 m; $v_S = 50 \text{ m/min}$; $a_S = 0,1 \text{ m/s}^2$

Die Simulationsergebnisse der Pendelauslenkung nach der Positionierung und dem Heben, die bei der Anwendung von Steuerungsstrategien entstehen, die mit dem Mittelwert der Tragseillänge berechnet werden, sind in **Abb. 6.46** dargestellt. Im Vergleich zu den Pendelauslenkungen ohne eine Kompensation des Lasthubs ist eine Reduzierung des Lastpendelns von durchschnittlich 200 % möglich, wenn die Schaltzeitpunkte der Steuerungsstrategien mit dem Mittelwert der Tragseillänge berechnet werden. Bei der Senkbewegung (s. **Abb. 6.47**) werden im Durchschnitt 96 % größere Auslenkungen im Vergleich zu den Simulationsergebnissen in **Abb. 6.46** erzielt.

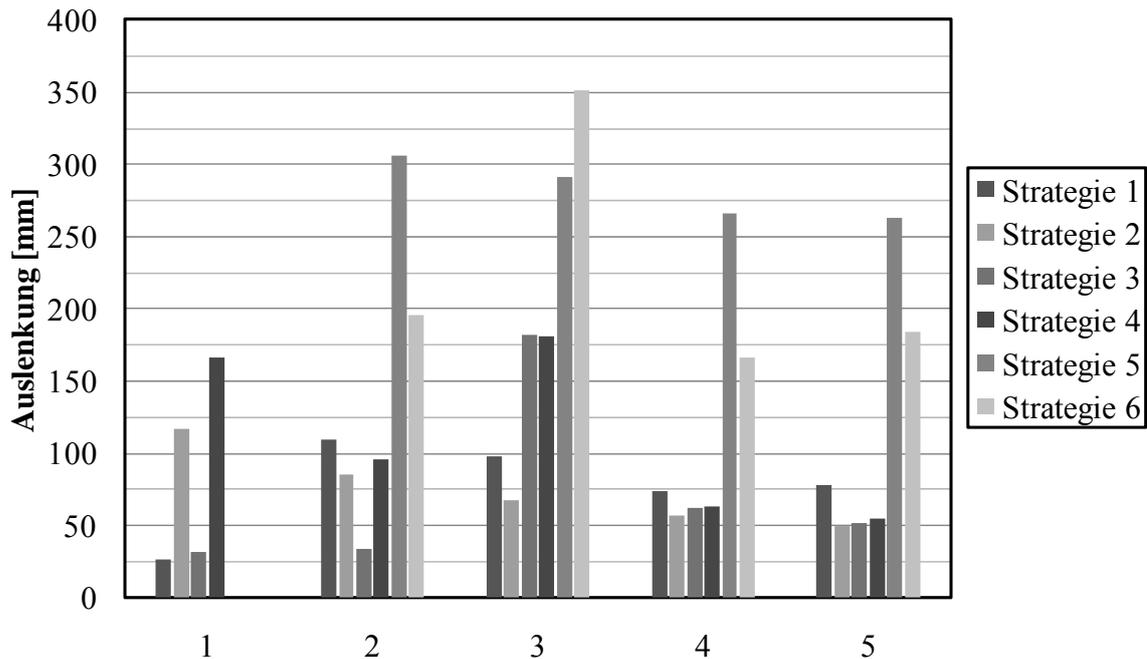


Abb. 6.48 Pendelauslenkung nach dem Verfahren und Heben der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Lasthub: 10 m; $v = 50$ m/min; $a_H = 0,2$ m/s²).

- 1: Berechnung mit separaten Mittelwerten für die Beschleunigung und Verzögerung
- 2: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 2,1$ s⁻¹
- 3: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹
- 4: Anwendung eines ZVD-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹
- 5: Anwendung eines ZVD-Shaper mit $\omega = 2,1$ s⁻¹

Der maximale Lastpendelausschlag nach der Positionierung, der bei dem Lasthub und einer Berechnung der Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 mit der Anwendung des Input-Shaping entsteht, ist in dem Diagramm in **Abb. 6.48** dargestellt. Bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich können die Auslenkungen durch eine getrennte Berechnung der Beschleunigungsintervalle und der Anwendung des Input-Shaping um durchschnittlich 52 % reduziert werden, im Vergleich zu den Simulationsergebnissen, bei denen für die Berechnung der Beschleunigungsintervalle nur die mittlere Tragseillänge verwendet wird. Den größten Einfluss auf die Steuerungsstrategien bzw. das geringste Lastpendeln nach der Positionierung bei den Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich kann dabei mit dem ZVD-Shaper erzielt werden.

Die Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich reagieren unterschiedlich bei der Anwendung des Input-Shaping. Durch die Anwendung von *Strategie 5* und den Einsatz des Input-Shaping werden Auslenkungen erzielt, die um durchschnittlich 56 % größer sind als die Auslenkung bei den Simulationsergebnissen nach **Abb. 6.46**. Dem gegenüber erzeugt der Einsatz von *Strategie 6* und der Anwendung des Input-Shaping eine durchschnittlich 54 % geringere Auslenkung gegenüber den Simulationsergebnissen ohne die Anwendung des Input-Shaping.

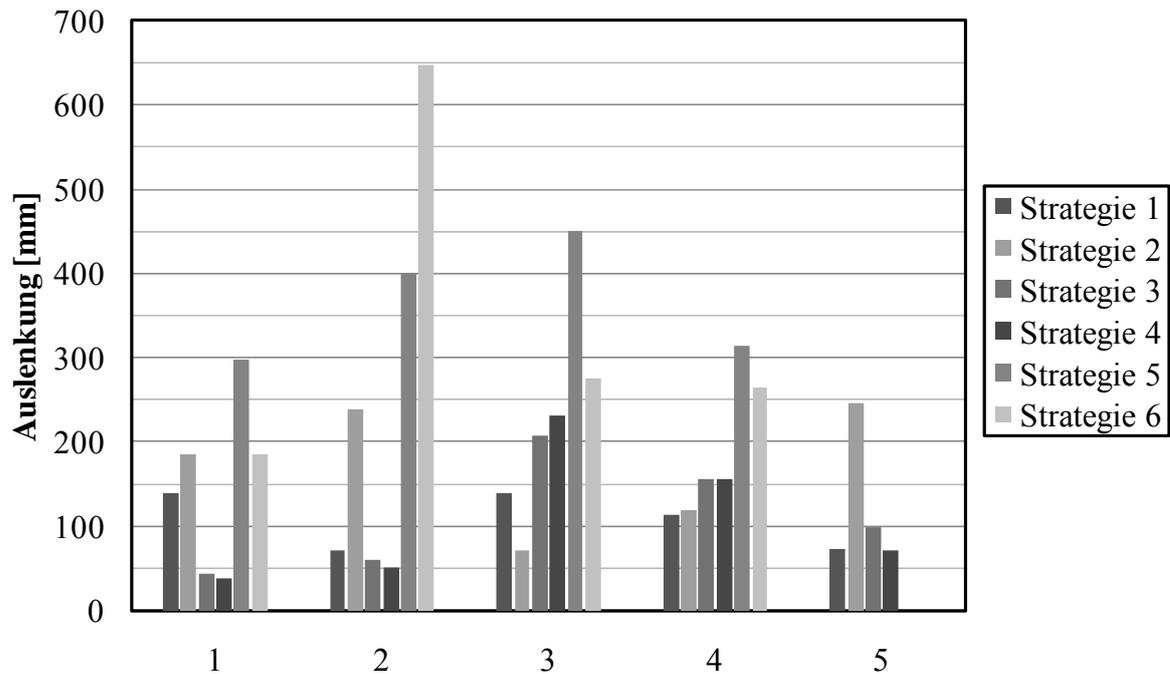


Abb. 6.49 Pendelauslenkung nach dem Verfahren und Senken der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Senkbewegung: 10 m; $v = 50$ m/min; $a_s = 0,2$ m/s²).

- 1: Berechnung mit separaten Mittelwerten für die Beschleunigung und Verzögerung
- 2: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 2,1$ s⁻¹
- 3: Anwendung eines ZV-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹
- 4: Anwendung eines ZVD-Shaper mit $\omega = 0,8$ s⁻¹
- 5: Anwendung eines ZVD-Shaper mit $\omega = 2,1$ s⁻¹

Die Simulationsergebnisse für die Anwendung des Input-Shaping beim Senken der Last sind in der **Abb. 6.49** dargestellt. Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen aus **Abb. 6.48** sind die maximalen Pendelwinkel nach der Positionierung beim Senken der Last um durchschnittlich 143 % größer als beim Heben. Im direkten Vergleich zu den Simulationsergebnissen, bei denen die Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 mit dem Mittelwert der Trageillänge berechnet werden, ermöglichen die Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich und der Einsatz des Input-Shaping eine Reduzierung der Auslenkung von durchschnittlich 76 %. Bei den Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich ist wie beim Heben eine Tendenz schwer feststellbar. Die *Strategie 5* verursacht bei der Anwendung des Input-Shaping ca. 38 % größere Auslenkungen als die Simulationsergebnisse aus der **Abb. 6.47**. Bei der Anwendung von *Strategie 6* werden demgegenüber 64 % geringere Auslenkungen erzielt.

6.5 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Die Spielzeit ist bei der Auswahl und der Gestaltung von Fördermitteln in Lagersystemen ein entscheidendes Auswahlkriterium. Als ein wesentlicher Bestandteil der Spielzeit ist die Positionierungszeit daher auch ein Kriterium zur Beurteilung der betrachteten Steuerungsstrategien. Die Simulationsuntersuchungen zeigen, dass die geringsten Positionierungszeiten bei der parallelen und der trapezförmigen Trageilanordnung durch die Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich erreicht werden können.

Bei der trapezförmigen Trageilanordnung entsteht eine Reduktion der Spielzeiten gegenüber der parallelen Trageilanordnung infolge einer Reduzierung der Periodendauer. Dabei ist die Reduzierung der Periodendauer vor allem davon abhängig, wie weit der imaginäre Trageilschnittpunkt von dem Massenschwerpunkt des LAM entfernt liegt. Je geringer der Abstand zwischen dem imaginären Trageilschnittpunkt und dem Massenschwerpunkt des LAM ist, desto geringer ist die Periodendauer. Ein Trageilwinkel von 4° ermöglicht bei der Geometrie des betrachteten Kransystems eine Zeitersparnis bei der Positionierung von max. 5 %. Größere Trageilwinkel sind aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll.

Neben der Positionierungszeit und der Auslenkung nach der Positionierung muss die maximale Auslenkung während der Positionierung bestimmt werden, um festzustellen, ob die Auslenkung während dem Verfahren einen Schaden an den zu transportierenden Gütern und/oder der Lagereinrichtung verursachen kann. Eine zu große Auslenkung während dem Verfahren macht eine Sicherung des Lagerguts notwendig. Die geringsten Auslenkungen während des Verfahrens werden bei der Positionierung mit der *Strategie 2* ermöglicht. Dem gegenüber entstehen die größten Auslenkungen bei der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich.

Ein Vergleich der Simulationsresultate zur Positionierungszeit mit den Ergebnissen der maximalen Auslenkung während dem Verfahren zeigt, dass die Dauer und die Höhe der Beschleunigung einen direkten Einfluss auf die Positionierungszeit und die Auslenkung haben. Bei einer geringen Beschleunigungsintensität und einer langen Beschleunigungsdauer werden hohe Positionierungszeiten und geringe maximale Auslenkungen erzielt. Dem entsprechend werden bei hohen Beschleunigungsintensitäten und kurzen Beschleunigungsdauern kürzere Positionierungszeiten und größere Auslenkung verursacht.

Bei der trapezförmigen Trageilanordnung mit einem Trageilwinkel von 1° werden maximale Auslenkungen erzielt, die fast identisch sind mit den maximalen Auslenkungen bei der parallelen Trageilanordnung. Ein größerer Trageilwinkel reduziert die maximale Auslenkung während des Verfahrens. Damit eine deutliche Reduzierung von ca. 10 % bei der maximalen Auslenkung erreicht wird, ist ein Trageilwinkel von mindestens 10° bei einer Trageillänge von 20 m notwendig. Bei einer Trageillänge von 10 m ist bereits ein Trageilwinkel von

mindestens 15° erforderlich, um die gleiche Reduzierung bei der maximalen Auslenkung zu erreichen.

Alle Steuerungsstrategien ermöglichen bei optimalen Randbedingungen theoretisch eine lastpendelfreie Positionierung. Sind keine optimalen Randbedingungen vorhanden, was i.d.R. der Fall ist, verursachen die betrachteten Steuerungsstrategien unterschiedlich große Auslenkungen nach der Positionierung. Zur Untersuchung der Robustheit der jeweiligen Steuerungsstrategien gegenüber kinematische Toleranzen wurden die Positionen der Beschleunigungsintervalle in festgelegten Schritten so lange vergrößert, bis die maximalen Auslenkungen feststanden.

Die Simulationsuntersuchungen zeigen, dass bei allen Steuerungsstrategien mit paralleler Tragseilanordnung die Auslenkung mit zunehmender Tragseillänge ansteigt. Dies kann dadurch begründet werden, dass die Dauer der Beschleunigungsintervalle bei jeder Steuerungsstrategie direkt von der Periodendauer abhängig ist. Bei einer anwachsenden Tragseillänge bzw. Periodendauer muss somit auch die Dauer des Beschleunigungsintervalls vergrößert werden, wodurch eine höhere Auslenkung verursacht wird. Die geringste Auslenkung nach der Positionierung kann mit der *Strategie 2* erzielt werden. Dem gegenüber werden die größten Auslenkungen nach der Positionierung von den Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich verursacht.

Bei der trapezförmigen Tragseilanordnung sinkt die Auslenkung des LAM nach der Positionierung mit einer anwachsenden Höhe unterhalb der Laufkatze. Eine Ursache hierfür ist der Bewegungsvorgang, der im Vergleich zu der parallelen Tragseilanordnung eine Kippbewegung des LAM um die y -Koordinatenachse ermöglicht. Gleichzeitig wird durch die Tragseilanordnung die Bewegungsbahn des LAM mit zunehmender Tragseillänge eingeschränkt, was schließlich eine geringere Auslenkung zur Folge hat /KIM04/. Der Unterschied zwischen den Auslenkungen bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung mit einem Tragseilwinkel von 4° und einer parallelen Tragseilanordnung ist unabhängig von der Verfahrensgeschwindigkeit so gering, dass eine Reduzierung der Auslenkung aufgrund der Tragseilanordnung nicht feststellbar ist.

Zusammenfassend sind die Vor- und Nachteile der jeweiligen Steuerungsstrategien für den Anwendungsfall einer konstanten Tragseillänge während des Verfahrens in der **Tab. 6.2** dargestellt. Die untersuchten Steuerungsstrategien besitzen unabhängig von der Tragseilanordnung die gleichen Eigenschaften bezüglich der verwendeten Bewertungskriterien. Aus diesem Grund ist die **Tab. 6.2** für parallele und trapezförmige Tragseilanordnungen gültig. Bezüglich der Verwendung einer trapezförmigen Tragseilanordnung als Lastpendeldämpfung zeigen die Simulationsuntersuchungen, dass für eine deutliche Leistungssteigerung und Lastpendeldämpfung ein Tragseilwinkel von mindestens 10° notwendig ist. Kleine Tragseilwinkel bis 4° , die einfach technisch realisiert werden können, ermöglichen lediglich eine Reduzierung

der Positionierungszeit von maximal 5 %. Einen signifikanten Einfluss der betrachteten Tragseilanordnung auf die Auslenkung kann anhand der Simulationsergebnisse nicht festgestellt werden.

| Steuerungsstrategie | Positionierungsdauer | Max. Auslenkung während des Verfahrens | Max. Auslenkung nach dem Verfahren |
|---------------------|----------------------|--|------------------------------------|
| <i>Strategie 1</i> | +- | + | +- |
| <i>Strategie 2</i> | -- | ++ | ++ |
| <i>Strategie 3</i> | +- | +- | + |
| <i>Strategie 4</i> | +- | - | - |
| <i>Strategie 5</i> | + | - | -- |
| <i>Strategie 6</i> | ++ | -- | -- |

Tab.6.2 Vor- und Nachteile der Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 bei einer konstanten Tragseillänge (++ = sehr gut; + = gut; +- = befriedigend; - = bedingt geeignet; -- = nicht geeignet)

Die Simulationsuntersuchungen für eine veränderliche Tragseillänge zeigen, dass eine Reduzierung der Tragseillänge während des Verfahrens nicht die Positionierungszeiten beeinflusst. Erst durch die Anpassung der Steuerungsstrategien an eine veränderliche Tragseillänge reduziert oder erhöht sich die Positionierungsdauer im Vergleich zu den Positionierungszeiten bei einer konstanten Tragseillänge. Bei dem Heben der Last und einer Berechnung der Steuerungsstrategien mit dem Mittelwert der Tragseillänge sind die Positionierungszeiten bei der parallelen und der trapezförmigen Tragseilanordnung um 4 % geringer als die Positionierungszeiten mit Steuerungsstrategien, die nicht an eine veränderliche Tragseillänge angepasst worden sind. Dem gegenüber erhöht sich die Positionierungszeit um 7 %, wenn die Steuerungsstrategien mit dem Mittelwert der Tragseillänge berechnet werden und die Last abgesenkt wird während dem Verfahren des Krans.

Die maximale Auslenkung während des Verfahrens ist bei einer veränderlichen Tragseillänge abhängig von der Distanz, die das LAM gehoben oder abgesenkt wird. Bei einem Lasthub von 10 m und einer parallelen Tragseilanordnung wird bei den Steuerungsstrategien, die mit dem Mittelwert der Tragseillänge berechnet werden, eine durchschnittliche Auslenkung von 382 mm (globaler Lastpendelausgleich) und 794 mm (lokaler Lastpendelausgleich) erreicht. Bei einem Lasthub von 22 m sind die maximalen Auslenkungen um durchschnittlich 36 % größer. Die maximalen Auslenkungen beim Senken der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien, die mit dem Mittelwert der Tragseillänge berechnet werden und einer parallelen Tragseilanordnung sind um durchschnittlich 30 % größer als beim Heben. Der Einsatz einer trapezförmigen Tragseilanordnung verursacht keine signifikant größeren oder kleineren Auslenkungen während dem Heben oder Senken.

Ebenso wie die Auslenkungen während dem Verfahren steigen auch die maximalen Auslenkungen nach der Positionierung bei einer veränderlichen Trageillänge während des Verfahrens. Bei der parallelen Trageilanordnung, der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich und einem Heben der Last während dem Verfahren entstehen durchschnittliche Auslenkungen von 213 mm (10 m Lasthub) bzw. 211 mm (20 m Lasthub). Die Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich verursacht durchschnittliche Auslenkungen von 450 mm (10 m Lasthub) bzw. 942 mm (20 m Lasthub) nach dem Heben der Last.

Obwohl die entstehenden Pendelwinkel nach dem Senken der Last geringer sind als nach dem Heben, entstehen größere Auslenkungen. Der Grund hierfür ist die Trageillänge, die nach dem Senken der Last größer ist als die Trageillänge nach dem Heben. Bei einem Senken der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich entstehen Auslenkungen nach der Positionierung von 384 mm (10 m Lasthub) bzw. 685 mm (22 m Lasthub). Die Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich erzeugt Auslenkungen von 715 mm (10 m Lasthub) bzw. 1567 mm (22 m Lasthub).

Bei der trapezförmigen Trageilanordnung und der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich entstehen Auslenkungen nach dem Heben der Last, die zwischen 13 % (10 m Lasthub) bis 52 % (20 m Lasthub) größer sind als die Auslenkungen bei der parallelen Trageilanordnung. Dem gegenüber ermöglicht die trapezförmige Trageilanordnung bei dem Einsatz von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich eine Reduzierung zwischen 37 % (10 m Lasthub) bis 6 % (20 m Lasthub). Beim Senken der Last sind die gleichen Tendenzen festzustellen.

Eine wirkungsvolle Methode zur Anpassung der Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 an eine veränderliche Trageillänge während dem Verfahren des Krans ist das Input-Shaping. Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass die maximalen Auslenkungen während des Verfahrens um ca. 30 % (parallelen Trageilanordnung) bis ca. 40 % (trapezförmige Trageilanordnung) beim Heben und Senken reduziert werden können im Vergleich zu Simulationen, bei denen die Steuerungsstrategien mit den Mittelwerten der Trageillänge berechnet werden.

Bei den maximalen Auslenkungen nach der Positionierung ermöglicht das Input-Shaping eine Reduzierung der Auslenkung von 50 % bis 76 % gegenüber den Steuerungsstrategien, bei denen die Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Trageillänge berechnet werden. Die besten Resultate erzeugen die Simulationen, bei denen ein ZV-Shaper eingesetzt wird, der mit einer Eigenkreisfrequenz von $\omega_0 = 2,1$ s berechnet wird. Untersuchungen zur Robustheit der einzelnen Shaper wurden nicht durchgeführt, da die Sensitivitätskurven (vgl. Kap. 4.2) zeigen, dass ein ZVD-Shaper eine größere Robustheit besitzt und somit geringere Auslenkungen hervorruft, wenn Abweichung zwischen der vorhandenen und der angenommenen Eigenkreisfrequenz auftreten.

Die Reduzierung der Auslenkung während und nach dem Verfahren gehen zur Last der Positionierungszeit. Bei der Anwendung eines ZV-Shaper mit einer Eigenkreisfrequenz von $\omega_0 = 2,1$ s ist die Positionierungszeit um 4,5 % größer als bei der Anwendung von *Strategie 1* und einer Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Trageillänge. Der Einsatz eines ZVD-Shaper erzeugt bei den gleichen Randbedingungen ca. 11 % größere Positionierungszeiten. Mit einer sinkenden Eigenkreisfrequenz steigt die prozentuale Veränderung der Positionierungszeit.

Zum Abschluss der Simulationsuntersuchung kann festgehalten werden, dass der Einsatz von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich bezüglich der Positionierungszeiten einen konkurrenzfähigen Einsatz von automatisierten Kranen in Parksyste men ermöglicht. Ein Nachteil der Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich sind die großen Auslenkungen infolge der geringen Robustheit. Durch die vorhandene Kenntnis der Auslenkungen, kann eine mechanisch wirkende Dämpfungsvorrichtung entwickelt werden, die eine schnelle Beseitigung dieser Auslenkung ermöglicht.

Eine spezielle Ladungssicherung der PKWs auf dem LAM ist nicht notwendig, da die maximalen Auslenkungen während des Verfahrens keine Gefahr darstellen. Dem gegenüber sollte bei dem Transport von Gütern eine zusätzliche Ladungssicherung vorgesehen werden. Der Einsatz einer trapezförmigen Trageilanordnung ist aufgrund des konstruktiven Aufwands und dem geringen Effekt nicht zu empfehlen. Bei einer veränderlichen Trageillänge während des Verfahrens ist die Anwendung des Input-Shaping das geeignetste Mittel zur Anpassung der Steuerungsstrategien an eine veränderliche Trageillänge.

7 Validierung der Simulationsmodelle und –ergebnisse

Die Validierung als Prüfung der Übereinstimmung zwischen einem Simulationsmodell und der Realität ist einer der wichtigsten Arbeitsschritte in einer Simulationsuntersuchung /VDI3633/. Erst nach einer Validierung kann ein Simulationsmodell als Entwicklungs- oder Optimierungsbasis eingesetzt werden /ZIR06/. In dieser Arbeit wird für die Validierung ein Kranmodell im Maßstab 1:10 verwendet. Die Versuchsparameter und Abmessungen sind durch die Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik an die Parameter des Simulationsmodells angepasst. Der Längenmaßstab φ_l ist bereits durch die Vorgabe des Maßstabs festgelegt.

$$\varphi_l = \frac{L_{\text{Modell}}}{L_{\text{Real}}} = 0,1 \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Da zwischen der Periodendauer und der Tragseillänge keine lineare Abhängigkeit besteht, unterscheidet sich der Stufensprung der Zeit φ_t (Gl. 7.2) von dem Längenmaßstab φ_l (Gl. 7.1). Mit der Gl. 7.3 kann schließlich der Stufensprung für die Beschleunigung der Laufkatze φ_a berechnet werden. Die Gl. 7.3 zeigt, dass die Beschleunigungen bei dem Labormodell und einem realen Kran identisch sein müssen. Sowohl der Stufensprung der Zeit als auch der Stufensprung der Beschleunigung sind invariabel.

$$\varphi_t = \frac{t_{\text{Modell}}}{t_{\text{Real}}} = 0,316 \quad (\text{Gl. 7.2})$$

$$\varphi_a = \frac{L_{\text{Modell}}}{L_{\text{Real}}} \frac{t_{\text{Real}}^2}{t_{\text{Modell}}^2} = \frac{\varphi_l}{(\varphi_t)^2} = 1 \quad (\text{Gl. 7.3})$$

7.1 Konstruktiver Aufbau des Labormodells

Die **Abb. 7.1** zeigt eine isometrische Darstellung des Kranmodells für die Validierung. Das Kranmodell besteht im Wesentlichen aus einer Linearführung mit einem angetriebenen Laufwagen. Auf dem Laufwagen befindet sich das Hubwerk. Der gesamte Laufwagen wird über einen Zahnriemen, der in die Linearführung integriert ist, und von einem Schrittmotor angetrieben. Der Antrieb des Hubwerks erfolgt ebenfalls durch einen Schrittmotor. Damit eine Einstellung des Tragseilwinkels möglich ist, kann die Position der Tragseilführung eingestellt werden. Zur Messung der Beschleunigung des Hubwerks und des LAM werden jeweils Micro-Electro-Mechanical-Sensors (MEMS) eingesetzt. Der Tragseilwinkel wird zusätzlich über einen Winkelsensor am Seil erfasst. Die Messsignale werden schließlich an einen Analog/Digital-Wandler übertragen, der sich bei den Versuchen mit einer konstanten Tragseillänge während des Verfahrens ebenfalls auf dem LAM befindet und eine Auswertung der Messergebnisse mit dem PC ermöglicht. Zur Spannungsversorgung der Sensoren sind

Batterien auf dem LAM befestigt. Das Massenträgheitsmoment Θ des LAM im Modell beträgt $0,08992 \text{ kgm}^2$ und wurde mit Hilfe des 3D-CAD-System AUTODESK INVENTOR 11 berechnet. Für die Experimente mit einer variablen Tragseillänge während des Verfahrens müssen der A/D-Wandler und die Batterien von dem LAM entfernt werden, um die Masse des LAM zu reduzieren und somit den Einsatz eines verfügbaren Schrittmotors zu ermöglichen.

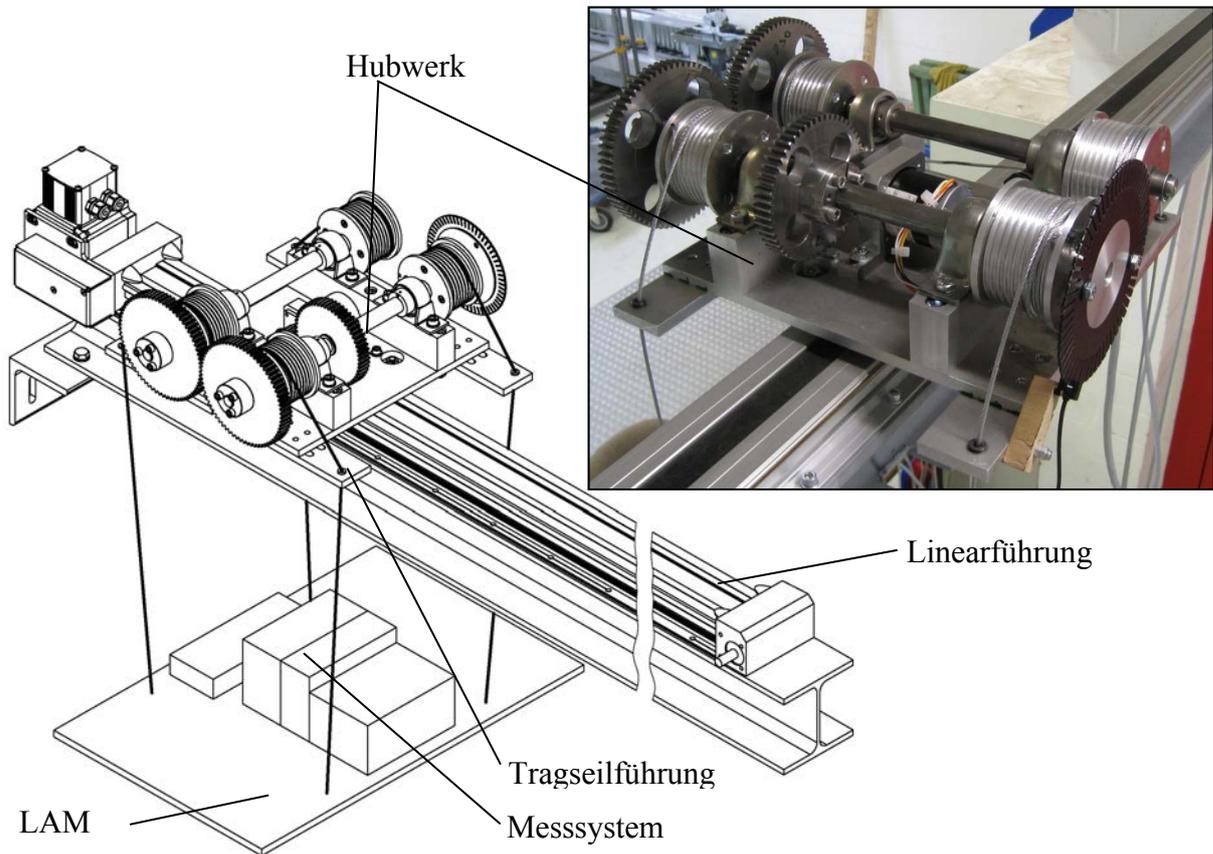


Abb. 7.1 Isometrische Darstellung des Modellkrans und Foto des Hubwerks (s. oben rechts)

In einem ersten Schritt vor der Durchführung von Positionierungsvorgängen wird zunächst das Schwingungsverhalten des LAM durch eine manuelle Auslenkung ermittelt. Das Diagramm in **Abb. 7.2** zeigt beispielhaft den Winkel- und Beschleunigungsverlauf für eine parallele Tragseilanordnung und eine Tragseillänge von 1,5 m. Bei der Betrachtung des Diagramms in **Abb. 7.2** ist ein deutliches Abklingverhalten bei der Pendelbewegung des Modell-LAM erkennbar. Dieses Abklingverhalten, welches vor allem auf Reibungen in der Tragseilführung zurückgeführt werden kann, wird in der Simulation nicht berücksichtigt.

In der **Tab. 7.1** ist die gemessene und berechnete Periodendauer für unterschiedliche Tragseillängen und -anordnungen aufgelistet. Die Abweichungen der Messergebnisse von den berechneten Werten entstehen vor allem aufgrund von Fehlern bei der Einstellung der Tragseillänge und durch die vorhandene Dämpfung. Bei der trapezförmigen Anordnung der Tragseile muss berücksichtigt werden, dass der Schwerpunkt nicht exakt bestimmt werden kann. Diese Ungenauigkeit macht eine exakte Berechnung der Periodendauer schwierig.

| Tragseillänge/Tragseilanordnung | Periodendauer im Labormodell | Theoretische Periodendauer |
|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 1,5 m / parallel | 2,39 s | 2,45 s |
| 1,5 m / trapez | 2,31 s | 2,44 s |
| 1 m / parallel | 1,98 s | 2,0 s |
| 1 m / trapez | 2,02 s | 1,98 s |

Tab. 7.1 Gegenüberstellung der gemessenen und der theoretischen Periodendauer

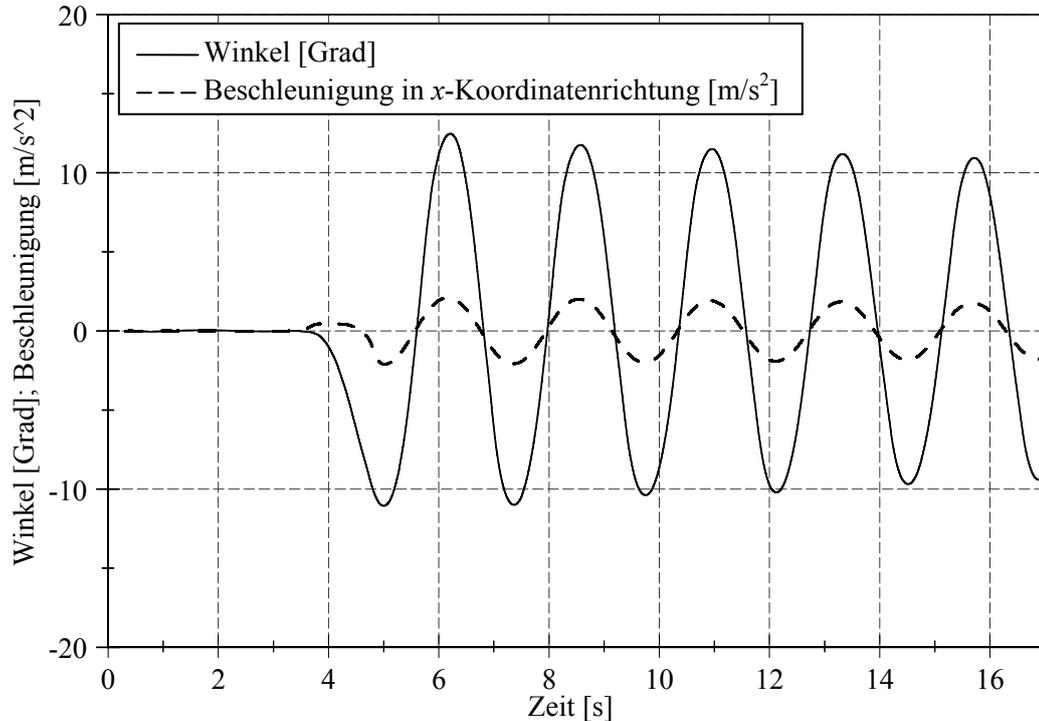


Abb. 7.2 Winkel und Beschleunigung des LAM bei einer manuellen Auslenkung und einer parallelen Tragseilanordnung mit $l = 1,5$ m.

Die Validierung der Simulationsmodelle und -ergebnisse erfolgt schließlich durch die Anwendung von Positionierungsvorgängen, bei denen die Beschleunigungs- und Verzögerungsintervalle mit den Steuerungsstrategien aus Kap. 4 berechnet wurden. Zur Validierung werden die Ergebnisse aus den Modellversuchen mit den entsprechenden Ergebnissen aus der Simulation verglichen. Als Parameter werden in den Modellexperimenten die maximale Verfahrgeschwindigkeit, die Tragseillänge und die Tragseilanordnung variiert. Die maximale Verfahrgeschwindigkeit wird in den Modellexperimenten mit 263 mm/s und 526 mm/s festgelegt. Diese Verfahrgeschwindigkeiten entsprechen Geschwindigkeiten von 50 bzw. 100 m/min bei einem Kran im Maßstab 1:1. Als Tragseillängen werden 1 m und 1,5 m für die Versuche gewählt. Die Hubgeschwindigkeit wird mit 52 mm/s festgelegt. Dies entspricht einer Hubgeschwindigkeit von 10 m/min im Original.

Neben den Modellversuchen mit einer parallelen Tragseilanordnung müssen auch Versuche mit einer trapezförmigen Tragseilanordnung durchgeführt werden. Dazu wird der Abstand zwischen den Tragseilen an den Stirnseiten der Laufkatze auf 480 mm eingestellt. Bei einem Tragseilabstand von 340 mm am Modell-LAM entsteht somit ein Tragseilwinkel zwischen

der Laufkatze und den Tragseilen von 4° bei einem Abstand zwischen dem LAM und der Laufkatze von $h = 1$ m oder $2,7^\circ$ bei einem Abstand von $h = 1,5$ m.

7.2 Messung des Lastpendelns bei einer konstanter Tragseillänge während des Verfahrens

Die Ergebnisse der einzelnen Modellexperimente sind im Anhang dargestellt. Zum direkten Vergleich wurden die Parameter der Modellexperimente in den entsprechenden Simulationsmodellen eingestellt. Dabei wurden kinematische Toleranzen berücksichtigt. Die Simulationsergebnisse sind schließlich zur einfachen Gegenüberstellung in ein Diagramm mit den Messergebnissen eingetragen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellexperimente mit einer konstanten Tragseillänge während dem Verfahren der Laufkatze beschrieben.

Die Diagramme in **Abb. 7.3** bis **Abb.7.6** zeigen die maximalen Auslenkungen nach dem Verfahren bei den Modellexperimenten und den entsprechenden Simulationen, in Abhängigkeit von der Tragseillänge, der Verfahrensgeschwindigkeit und der Tragseilanordnung. Die maximalen Auslenkungen nach dem Verfahren sind i.d.R. bei allen Modellexperimenten größer als in der Simulation. Bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 263 mm/s werden mit der parallelen Tragseilanordnung durchschnittlich $0,08^\circ$ größere Auslenkungen bei den Modellexperimenten erzielt. Eine Verfahrensgeschwindigkeit von 526 mm/s verursacht maximale Auslenkungen bei den Modellexperimenten, die im Durchschnitt um $0,3^\circ$ größer sind als in der Simulation. Bei den Modellexperimenten mit einer trapezförmigen Tragseilanordnung entstehen vergleichbare Resultate.

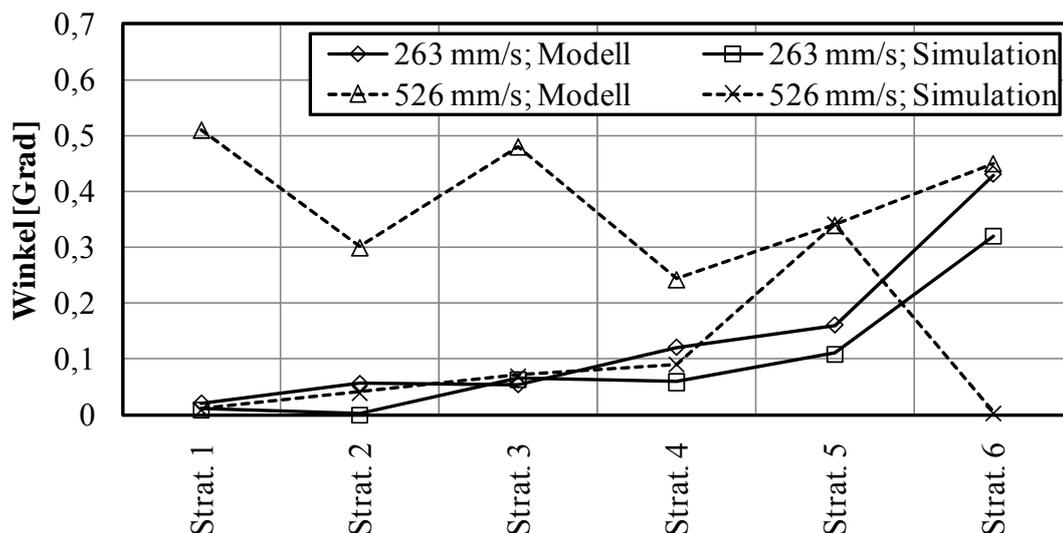


Abb. 7.3 Maximale Auslenkungen nach dem Verfahren im Modellversuch und der Simulation, bei einer parallelen Tragseilanordnung und einer Tragseillänge von $l = 1$ m.

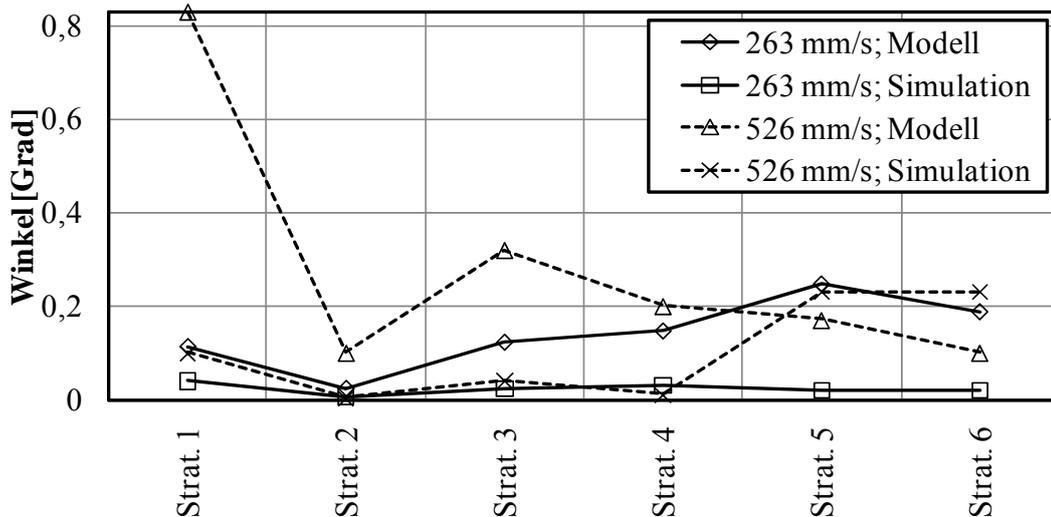


Abb. 7.4 Maximale Auslenkungen nach dem Verfahren im Modellversuch und der Simulation, bei einer parallelen Trageileanordnung und einer Trageillänge von $l=1,5$ m.

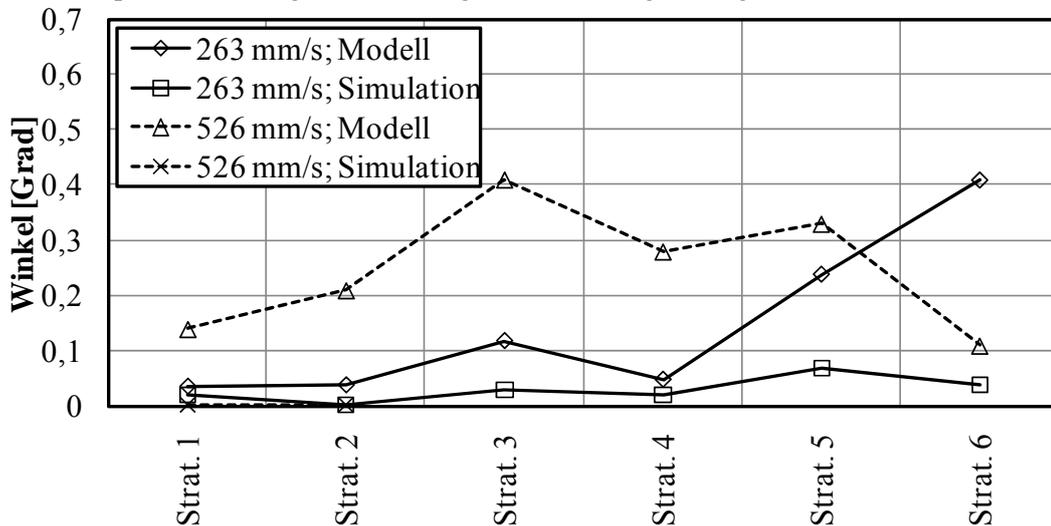


Abb. 7.5 Maximale Auslenkungen nach dem Verfahren im Modellversuch und der Simulation, bei einer trapezförmigen Trageileanordnung und einem Abstand des LAM zur Laufkatze von $h = 1$ m.

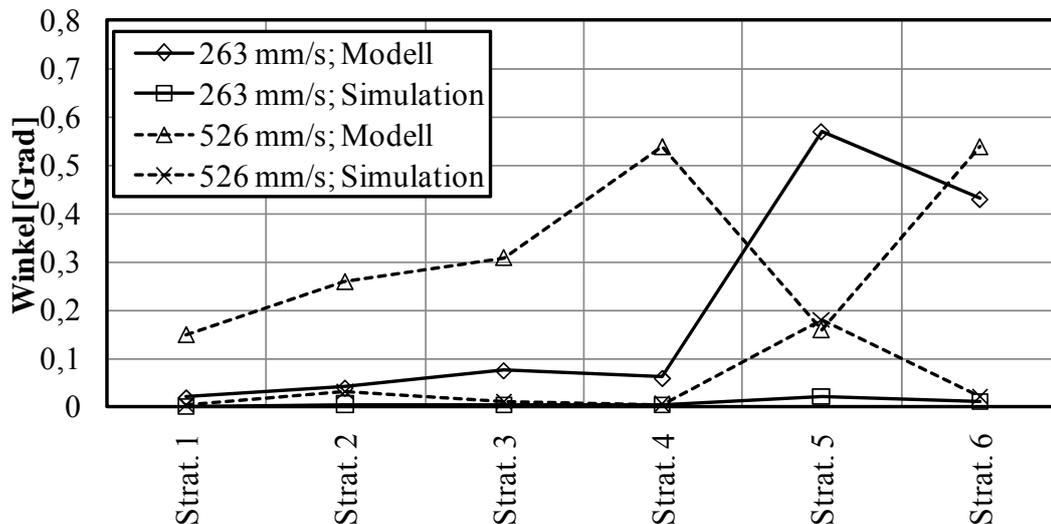


Abb. 7.6 Maximale Auslenkung nach dem Verfahren im Modellversuch und der Simulation, bei einer trapezförmigen Trageileanordnung und einem Abstand des LAM zur Laufkatze von $h = 1,5$ m.

Die maximalen Auslenkungen während des Verfahrens, die in den Modellversuchen und in der Simulation entstehen, sind in den Diagrammen in **Abb. 7.7** bis **Abb. 7.10** dargestellt. Bei der Auswertung der Messergebnisse lässt sich sofort erkennen, dass die Auslenkungen bei höheren Verfahrensgeschwindigkeiten größer sind. Im Gegensatz zu den Pendelauslenkungen nach der Positionierung sind die Auslenkungen, die in den Modellexperimenten und bei der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich entstehen, zum Teil geringer, als die Auslenkungen bei den entsprechenden Simulationsergebnissen.

Im Durchschnitt sind die maximalen Auslenkungen während der Positionierung bei den Modellexperimenten und der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich bei einer paralleler Tragseilanordnung und einer Verfahrensgeschwindigkeit von 263 mm/s um durchschnittlich $0,07^\circ$ geringer als die Simulationsergebnisse. Bei den gleichen Parametern und einer Verfahrensgeschwindigkeit von 526 mm/s werden Auslenkungen während des Verfahrens der Laufkatze verursacht, die bis zu $0,03^\circ$ geringer sind als die Simulationsergebnisse. Bei den Modellversuchen mit einem lokalen Lastpendelausgleich werden im Vergleich zu den Simulationen im Durchschnitt $1,57^\circ$ geringere Auslenkungen erreicht.

Die Anwendung einer trapezförmigen Tragseilanordnung erzeugt bei allen Modellexperimenten ein größeres Lastpendeln während der Positionierung als in der Simulation. Im Durchschnitt entstehen Pendelschwingungen bei den Modellexperimenten mit einer trapezförmiger Tragseilanordnung und einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von 263 mm/s während der Positionierung, die um durchschnittlich $0,73^\circ$ größer sind als in der Simulation. Bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 526 mm/s sind die Pendelschwingungen in den Modellexperimenten um durchschnittlich $2,06^\circ$ größer.

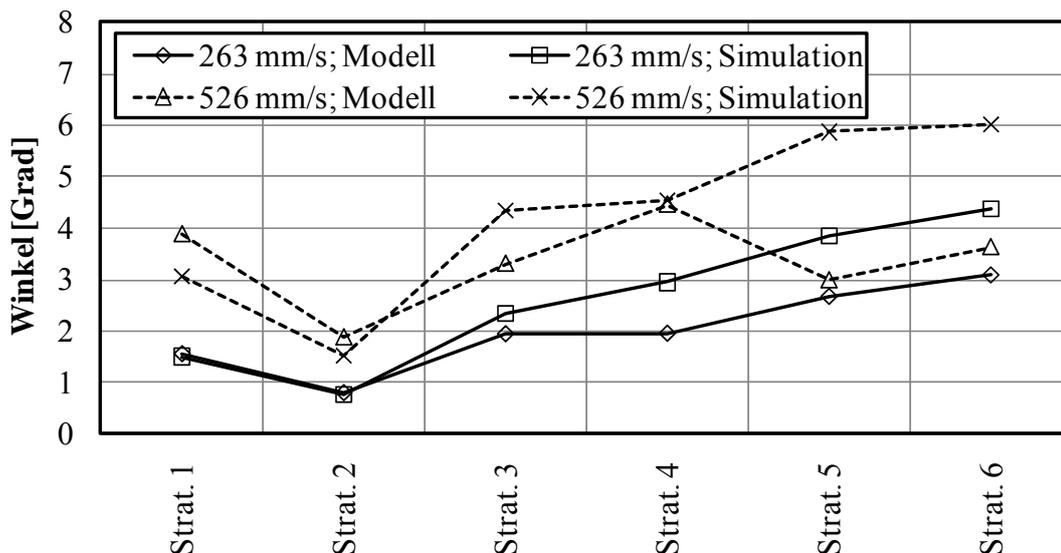


Abb. 7.7 Maximale Auslenkungen während des Verfahrens im Modellversuch und der Simulation, bei einer parallelen Tragseilanordnung und einer Tragseillänge von $l = 1$ m.

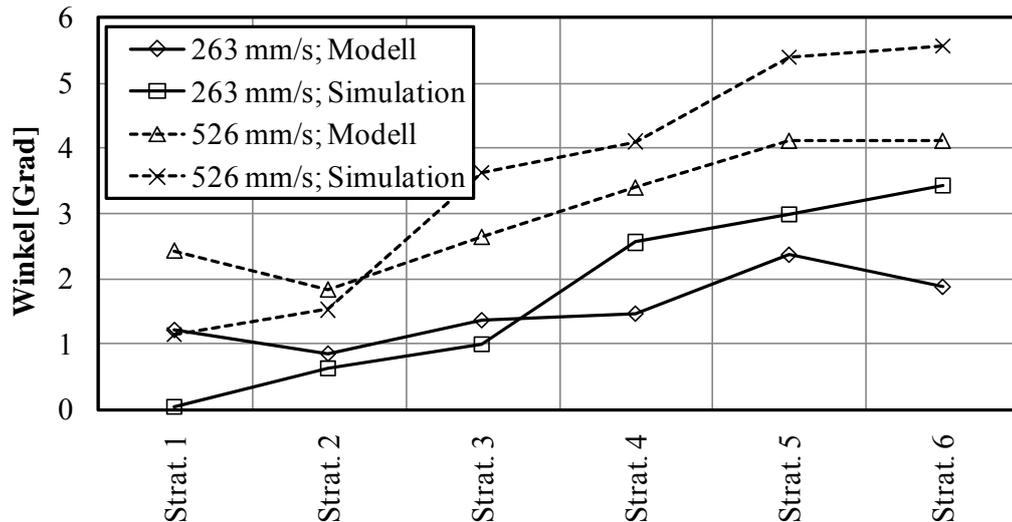


Abb. 7.8 Maximale Auslenkungen während des Verfahrens im Modellversuch und der Simulation, bei einer parallelen Trageileanordnung und einer Trageillänge von $l = 1,5$ m.

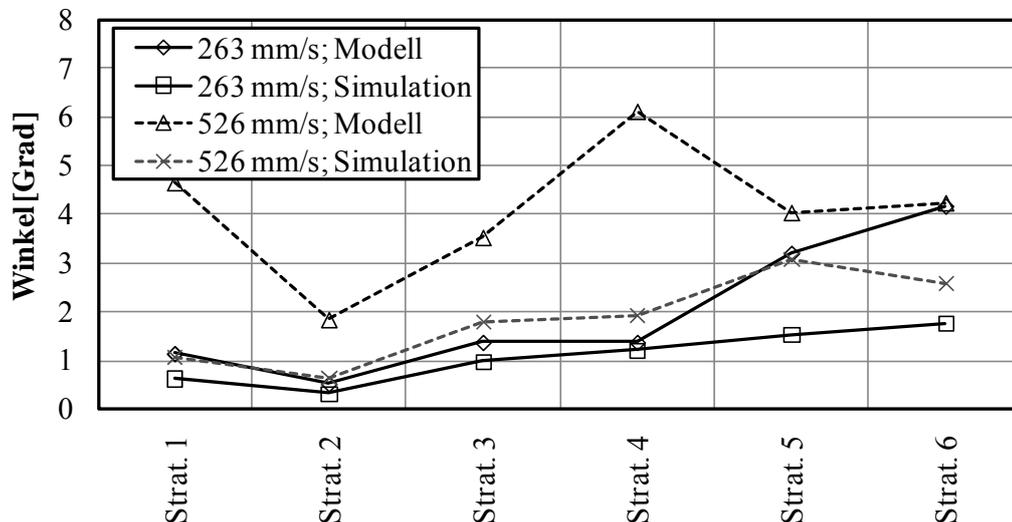


Abb. 7.9 Maximale Auslenkungen während des Verfahrens im Modellversuch und der Simulation, bei einer trapezförmigen Trageileanordnung und einem Abstand des LAM zur Laufkatze von $h = 1$ m.

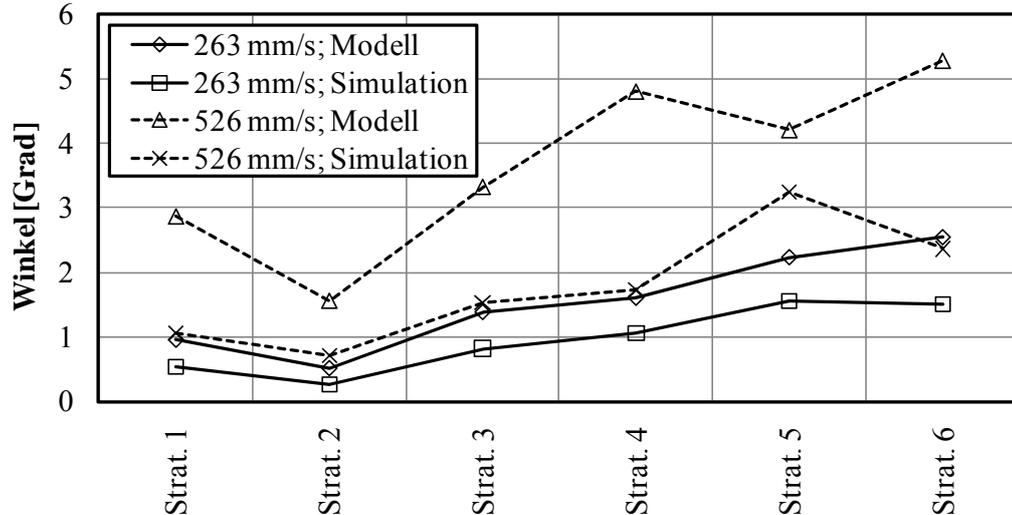


Abb. 7.10 Maximale Auslenkungen während des Verfahrens im Modellversuch und in der Simulation, bei einer trapezförmigen Trageileanordnung und einem Abstand des LAM zur Laufkatze von $h = 1,5$ m.

Ein qualitativer Vergleich zwischen den Simulationsexperimenten und den Modellversuchen zeigt, dass sich die Pendelbewegungen im Wesentlichen durch die Amplituden unterscheiden. Der Bewegungsablauf des Lastpendelns ist bei den Simulationsexperimenten und den Modellexperimenten übereinstimmend. Damit ist bereits nachgewiesen, dass die entwickelten mathematischen Modelle für eine konstante Trageillänge während des Verfahrens das Schwingungsverhalten korrekt wiedergeben.

Die vorhandenen Abweichungen zwischen den Amplituden der Schwingungen bei den Modellexperimenten und den Simulationen können auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden. Mögliche Ursachen sind die Vereinfachungen, die bei der Modellbildung vorgenommen worden sind (vgl. Kap. 5). Des Weiteren können die Versuchsparameter, wie z.B. die Schaltzeitpunkte, die Trageillänge und die Lage des Schwerpunktes, im Modell nicht so exakt eingestellt werden wie in der Simulation. Durch diese Ungenauigkeiten bei der Parametereinstellung entstehen ebenfalls Abweichungen zwischen den Modell- und den Simulationsergebnissen.

Zusätzlich zu den genannten Ursachen entstehen Differenzen zwischen den Modell- und den Simulationsergebnissen durch ruckartige Beschleunigungen der Laufkatze. Die ruckartigen und ungleichmäßigen Beschleunigungen der Laufkatze entstehen aufgrund einer Unterteilung der Geschwindigkeitsverläufe in mehrere Intervalle mit konstanter Geschwindigkeit. Diese Unterteilung der Geschwindigkeitsverläufe ist notwendig, da die zur Verfügung stehende Steuerung der Schrittmotoren keine direkte Einstellung der Beschleunigung ermöglicht. Um trotzdem eine Beschleunigungseinstellung realisieren zu können, müssen die berechneten Beschleunigungsintervalle im Modell nachgebildet werden. Dazu wird der Geschwindigkeitsverlauf, der aufgrund der berechneten Beschleunigungsintervalle entsteht, in gleich große Intervalle mit jeweils konstanter Fahrgeschwindigkeit unterteilt. Diese Geschwindigkeitsintervalle können mit der Steuerung der Schrittmotoren nachgebildet werden. Die **Abb. 7.11** zeigt schematisch, wie ein linear ansteigender Geschwindigkeitsverlauf durch Intervalle mit konstanter Geschwindigkeit nachgebildet wird.

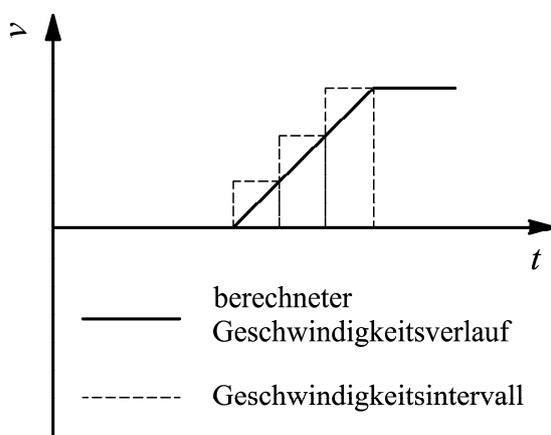


Abb. 7.11

Unterteilung eines Geschwindigkeitsverlaufs in mehrere Intervalle mit konstanter Geschwindigkeit

Weitere Störeinflüsse, die nur bei den Modellversuchen auftreten und nicht in der Simulation berücksichtigt werden, sind Drehschwingungen in der x - y -Koordinatenebene und Längsschwingungen in der y - z -Koordinatenebene. Diese Schwingungen werden durch die Auslenkungen des LAM angeregt und überlagern das Lastpendeln. Da die Periodendauer der Längs- und der Drehschwingungen die gleiche Größenordnung besitzt wie die Periodendauer des Lastpendelns in der x - z -Koordinatenebene, entsteht eine Pendelbewegung mit unterschiedlich großen Amplituden. Die **Abb. 7.12** zeigt den beschriebenen Zusammenhang am Beispiel eines gemessenen Pendelvorgangs.

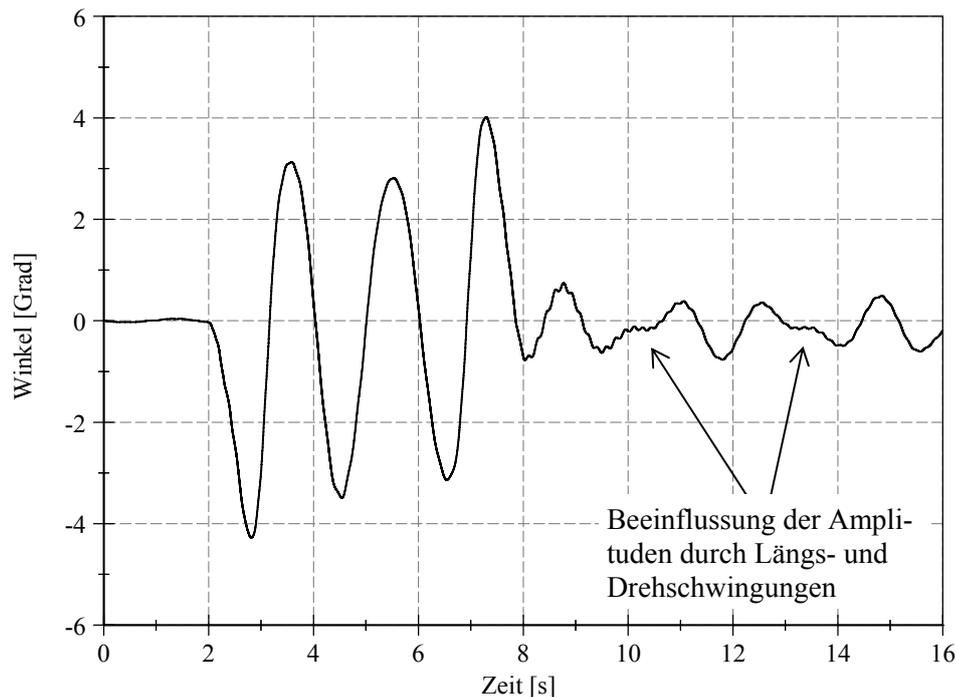


Abb. 7.12 Beispiel für die Auswirkung von Drehschwingungen auf die Pendelauslenkungen (die Drehschwingungen wurden hier durch eine unsymmetrische Tragseilaufhängung verstärkt)

Verursacht werden die Längs- und Drehschwingungen durch geometrische Toleranzen, wie z.B. Längenunterschiede bei den einzelnen Tragseilen, eine asymmetrische Tragseilanordnung und/oder eine Verlagerung des Massenschwerpunkts außerhalb des geometrischen Schwerpunkts. Besonders bei der trapezförmigen Tragseilanordnung besitzt die Anordnung des Masseschwerpunkts einen großen Einfluss, da das LAM beim Lastpendeln auch rotatorisch ausgelenkt wird (vgl. **Abb. 5.23**). Bei einer Verlagerung des Masseschwerpunkts außerhalb des geometrischen Schwerpunkts ändert sich das Trägheitsmoment des LAM und somit auch das Lastpendeln. Die größeren Auslenkungen bei den Modellexperimenten mit einer trapezförmigen Tragseilanordnung können zum Teil auf eine außermittige Verlagerung des Massenschwerpunkts zurückgeführt werden.

7.3 Messung des Lastpendelns bei einer variablen Tragseillänge während des Verfahrens

Die Messwerte zu den durchgeführten Modellversuchen für eine variable Tragseillänge während des Verfahrens sind im gleichen Umfang wie die Messwerte zu Kap. 7.2 im Anhang dargestellt. Ebenso wie zur Validierung der Simulationsmodelle für eine konstante Tragseillänge während des Verfahrens ist auch bei der Validierung der Simulationsmodelle für eine variable Tragseillänge während des Verfahrens eine Betrachtung des Pendelverhaltens ohne ein Verfahren der Laufkatze zunächst sinnvoll. In den Diagrammen in **Abb. 7.13** und **Abb. 7.14** ist das Schwingungsverhalten bei einer manuellen Auslenkung des LAM und einem Heben bzw. Senken der Last während der Pendelbewegung dargestellt. Damit ein Vergleich des Schwingungsverhaltens möglich ist, sind die Amplituden der Schwingungen vor dem Heben und Senken sowie der Beginn des Hub- und Senkvorgangs in den Simulationen an die Messergebnisse angeglichen.

Bei den Modellexperimenten mit einem Anheben des LAM während dem Lastpendeln ist im Gegensatz zu den Simulationsergebnissen kein Anwachsen der Amplituden zu erkennen. Unter der Berücksichtigung einer Nullpunktverschiebung während der Durchführung der Messung ergibt eine Auswertung der Messergebnisse, dass sich die Amplituden während des Hebens nicht ändern. Daraus lässt sich schließen, dass die Vergrößerung der Amplituden infolge einer Verkürzung der Tragseillänge gerade so groß ist, dass die Systemdämpfung aufgehoben wird. Ein Vergleich des zeitlichen Schwingungsverlaufs zeigt, dass sich die Periodendauer in jeder Schwingungsperiode während des Hebens um durchschnittlich 0,09 s im Modell und 0,08 s in der Simulation reduziert.

Bei den Modellexperimenten mit einem manuell ausgelenkten LAM und einer zunehmenden Tragseillänge während der Pendelbewegung reduzieren sich die Amplituden während des Senkvorgangs. Die Reduzierung der Amplituden ist dabei deutlich größer als die Reduzierung der Amplituden infolge der Systemdämpfung. Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen ist die Verringerung der Schwingungsamplituden im Modell größer. Dies kann auf irreversible Systemeinflüsse zurückgeführt werden. Die durchschnittliche Abnahme der Periodendauer in jeder Schwingungsperiode beträgt während dem Senken des LAM im Modell und der Simulation ca. 0,08 s.

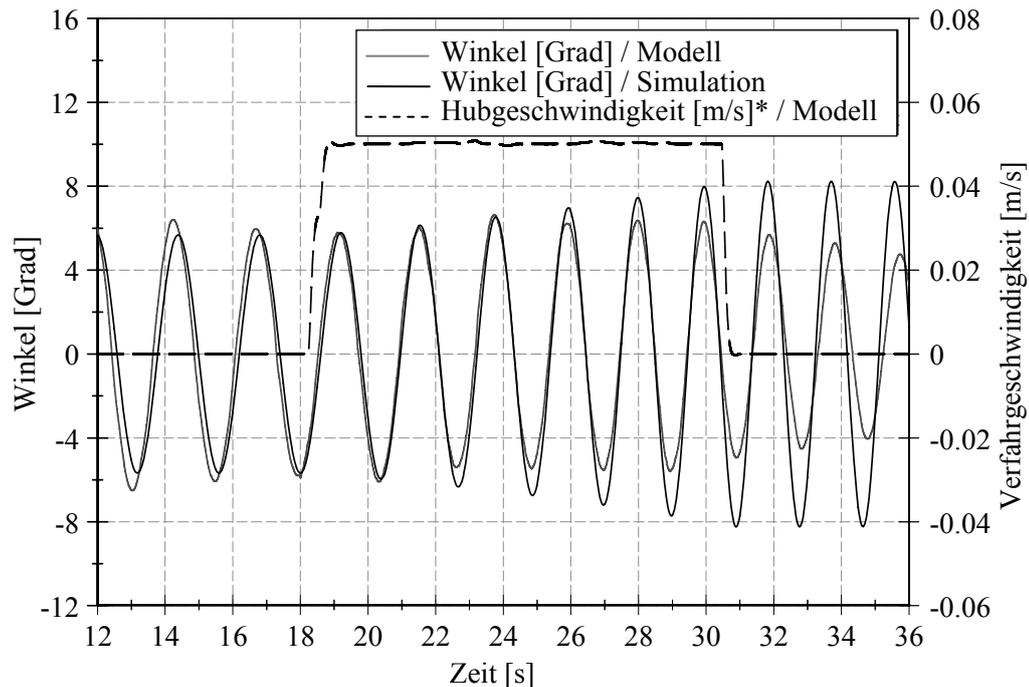


Abb. 7.13 Pendelschwingung im Modell und der Simulation bei einer manuellen Auslenkung des LAM und einem Lasthub von 0,5 m, einer Trageisllänge $l_0 = 1,5$ m zum Beginn der Hubbewegung und einer Hubgeschwindigkeit von 52 mm/s

*Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden

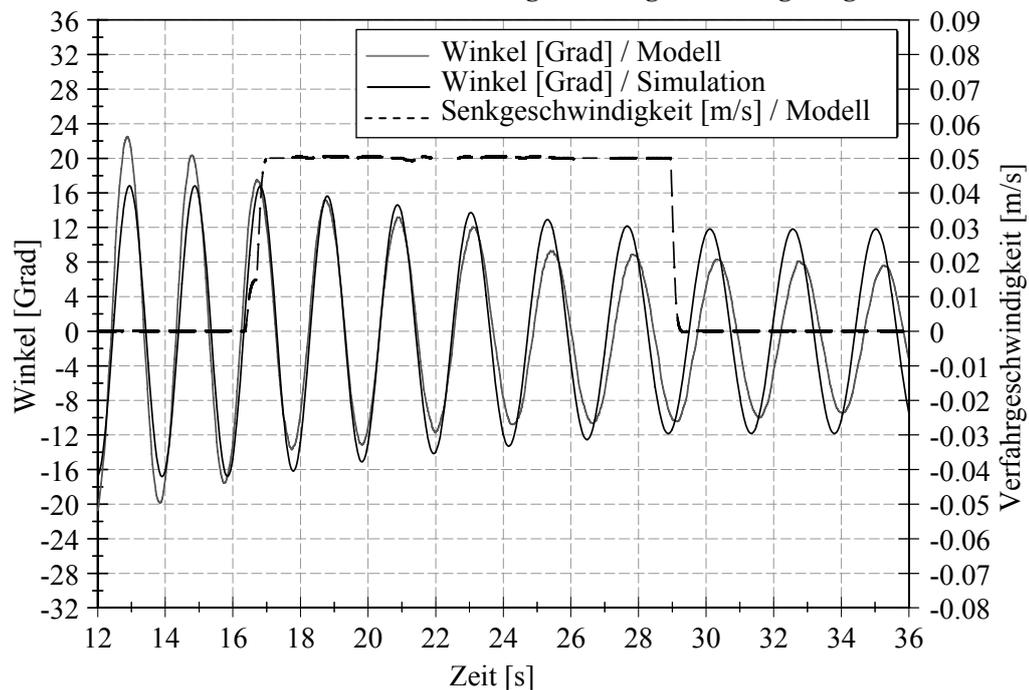


Abb. 7.14 Pendelschwingung im Modell und der Simulation bei der manuellen Auslenkung des LAM und einem Senken der Last um 0,5 m, einer Trageisllänge $l_0 = 1$ m zum Beginn des Senkvorgangs und einer Senkgeschwindigkeit von 52 mm/s.

Nachdem das grundsätzliche Pendelverhalten des Kranmodells bei dem Heben und Senken der Last während einer Pendelbewegung bekannt ist, muss untersucht werden, ob die Modellversuche eine Validierung der Simulationsmodelle und -ergebnisse für eine veränderliche Trageisllänge zulassen. Zu diesem Zweck werden zum Verfahren der Laufkatze die gleichen

Steuerungsstrategien angewendet wie bei den Modellversuchen mit einer konstanter Trage-seillänge während des Verfahrens. Die Verfahrgeschwindigkeit der Laufkatze wird bei allen Versuchen mit 263 mm/s festgelegt. Der Lasthub und das Senken der Last werden mit max. 52 mm/s durchgeführt. Dabei werden die Hub- und Senkbeschleunigung zeitlich an die Beschleunigung der Laufkatze angepasst und das Erreichen der Endgeschwindigkeit ebenso stufenweise durchgeführt wie bei dem Verfahren der Laufkatze.

Die Dauer des Hub- und Senkvorgangs ist bei allen Versuchen so gewählt, dass das Heben und Senken gleichzeitig mit der Verfahrbewegung der Laufkatze beendet ist. Eine Variation der Verfahrgeschwindigkeiten ist bei diesen Versuchen nicht notwendig, da sich die Geschwindigkeit der Laufkatze nur auf die Amplituden der Pendelschwingung auswirkt und dieser Einfluss bereits durch die Versuchsergebnisse mit konstanter Trage-seillänge bekannt ist. Eine Erhöhung der Hubgeschwindigkeit ist aufgrund der vorhandenen Motorleistung nicht möglich. Neben der parallelen Trage-seilanordnung wird auch eine trapezförmige Trage-seilanordnung untersucht. Dabei werden die gleichen Trage-seilwinkel eingestellt wie bei den Modellversuchen mit einer konstanten Trage-seillänge.

Die maximalen Auslenkungen während des Verfahrens und nach der Positionierung, die in den Modellversuchen und den entsprechenden Simulationen bei einer parallelen Trage-seilanordnung entstehen, sind in der **Abb. 7.15** und **Abb. 7.16** dargestellt. Zur einfachen Gegenüberstellung werden in den Simulationen die gleichen Parameter angewendet wie in den entsprechenden Modellexperimenten. Ebenso wie bei den Modellversuchen mit einer konstanten Trage-seillänge während des Verfahrens und der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich sind die maximalen Auslenkungen während des Verfahrens der Laufkatze im Modell geringer als in der Simulation. Im Durchschnitt beträgt die Abweichung zwischen den Modell- und den Simulationsergebnissen während der Positionierung $0,28^\circ$ beim Heben und $2,09^\circ$ beim Senken, wenn Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich angewendet werden. Die Durchführung von Modellversuchen und die Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich erzeugt maximale Pendelauslenkungen während des Verfahrens, die beim Heben und Senken im Durchschnitt $0,4^\circ$ größer sind als in der Simulation.

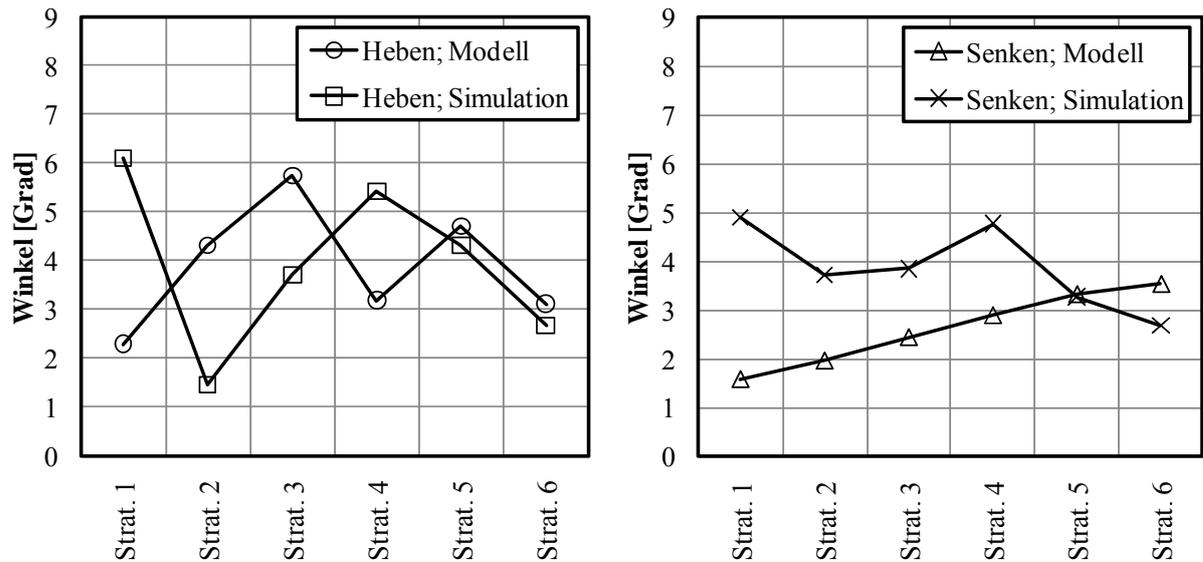


Abb. 7.15 Maximale Auslenkung während der Positionierung in den Modellexperimenten und den Simulationen, bei dem Heben (links) und Senken (rechts) des LAM und einer parallelen Trageileanordnung.

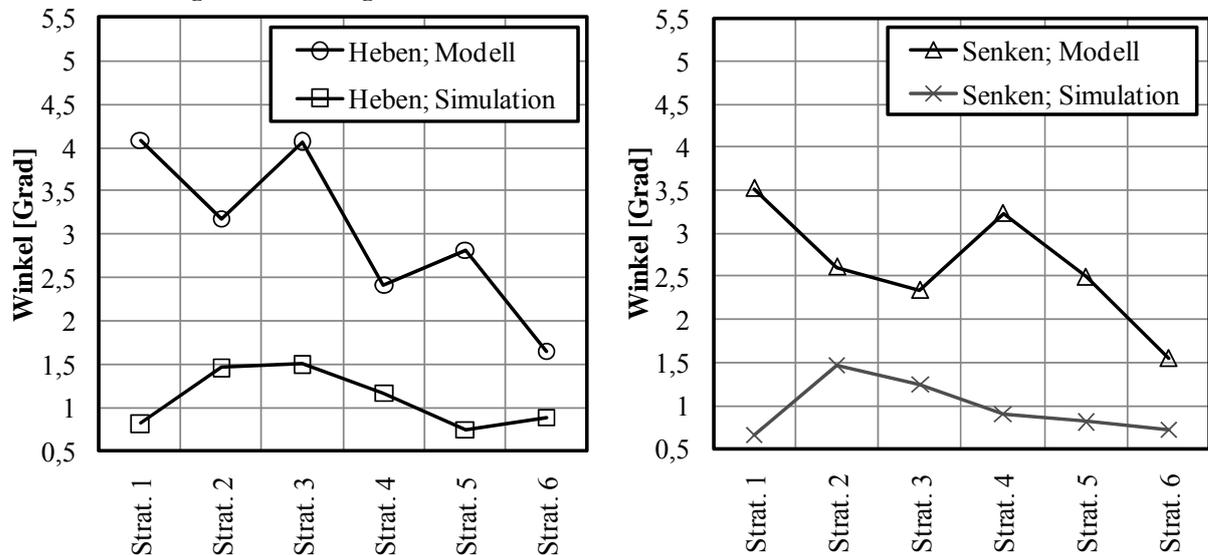


Abb. 7.16 Maximale Auslenkung nach der Positionierung in den Modellexperimenten und den Simulationen, bei dem Heben (links) und Senken (rechts) des LAM und einer parallelen Trageileanordnung.

Nach der Positionierung und einem gleichzeitigen Heben oder Senken der Last während des Verfahrens werden in den Modellversuchen sowohl bei der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich als auch bei der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich größere Auslenkungen erzielt als in den Simulationen. Bei der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich beträgt die Differenz zwischen den Auslenkungen in den Modellversuchen und den Simulationen nach der Positionierung durchschnittlich 2° beim Heben und Senken der Last. Bei der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich entsteht eine durchschnittliche Abweichung zwischen den Modell- und den Simulationsergebnissen von $1,3^\circ$, wenn die Last während des Verfahrens gehoben oder abgesenkt wird.

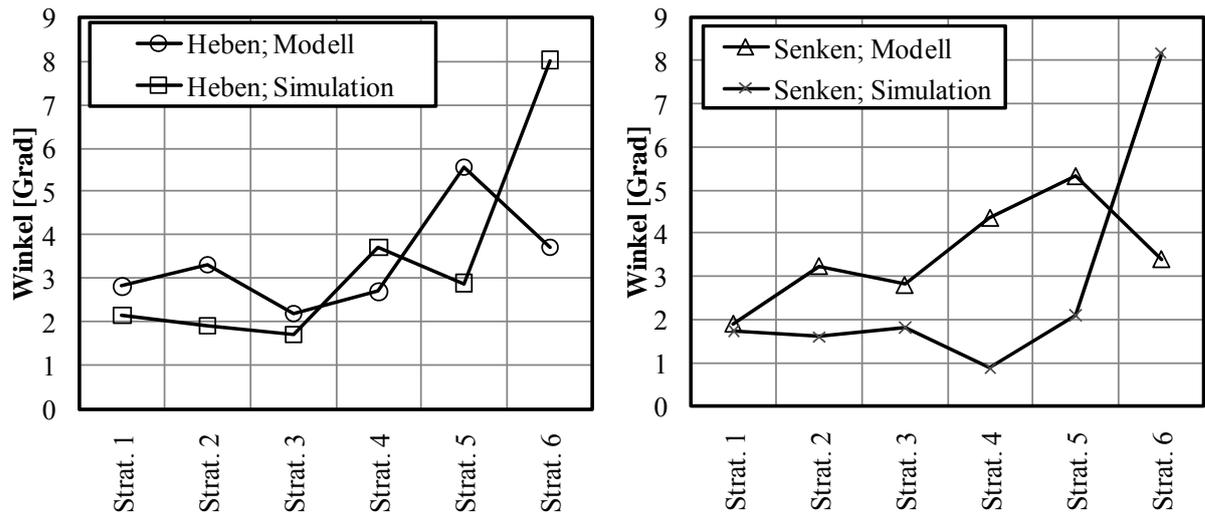


Abb. 7.17 Maximale Auslenkungen während der Positionierung in den Modellexperimenten und den Simulationen, bei dem Heben (rechts) und Senken (links) des LAM und einer trapezförmigen Trageeilanordnung.

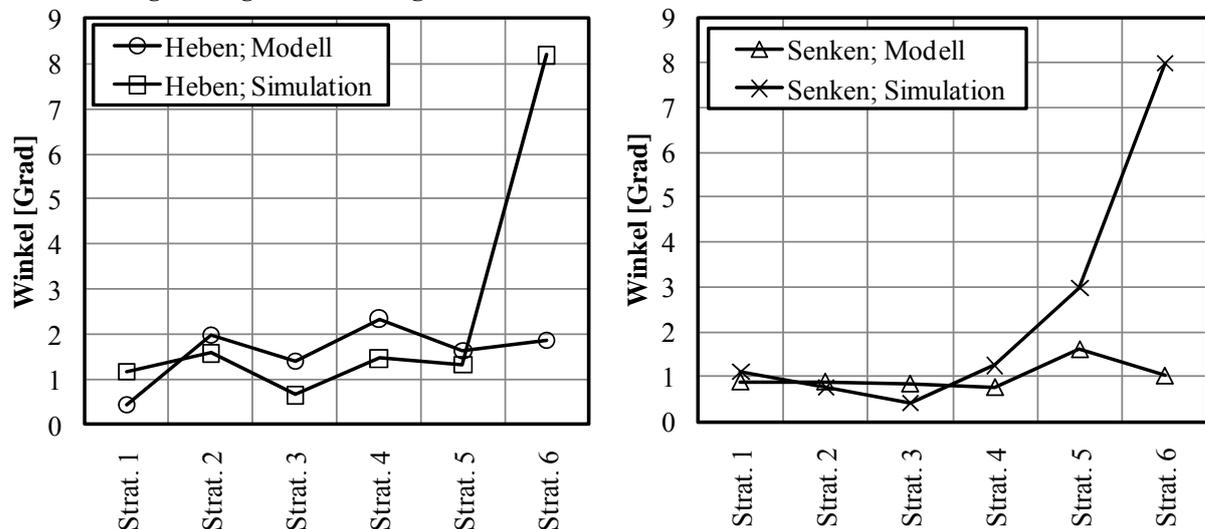


Abb. 7.18 Maximale Auslenkungen nach der Positionierung in den Modellexperimenten und den Simulationen, bei dem Heben (rechts) und Senken (links) des LAM und einer trapezförmigen Trageeilanordnung.

Die Ergebnisse der Modellversuche und der dazugehörigen Simulationen, die bei der Anwendung einer trapezförmigen Trageeilanordnung entstehen, sind in der **Abb. 7.17** und **Abb. 7.18** dargestellt. Bei dem Einsatz einer trapezförmigen Trageeilanordnung und der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich werden Auslenkungen während der Positionierung erzeugt, die um durchschnittlich $0,98^\circ$ größer sind als die Auslenkungen in den entsprechenden Simulationen. Bei der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich entstehen während des Verfahrens in den Modellversuchen durchschnittlich $2,95^\circ$ größere Auslenkungen bei der Anwendung von *Strategie 5* und $4,54^\circ$ geringere Auslenkungen bei der Anwendung von *Strategie 6*. Nach der Positionierung werden bei der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem globalen Lastpendelausgleich Auslenkungen in den Modellversuchen gemessen, die um $0,15^\circ$ größer sind

als in der Simulation. Die Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich erzeugt Auslenkungen in den Modellversuchen, die um durchschnittlich $3,5^\circ$ geringer sind.

7.4 Einfluss geometrischer Toleranzen

Die Simulationsmodelle und –ergebnisse aus Kap. 5 und 6 sind für Kransysteme mit ideal eingestellten Tragseillängen, Tragseilabständen und Schwerpunktpositionen gültig. In realen Systemen trifft diese Annahme nicht zu. In Folge von Fertigungstoleranzen, Toleranzen bei der Montage und/oder Verschleiß bzw. Kriechvorgängen ändern sich die einzelnen Tragseillängen. Darüber hinaus ist eine gleichmäßige Beladung des LAM schwer möglich, so dass sich der Schwerpunkt immer an einer anderen Position befindet. Durch die beschriebenen Einflüsse wird das Lastpendeln, welches durch kinematische Toleranzen entsteht, zusätzlich beeinflusst. Eine Integration von geometrischen Toleranzen in die Simulationsmodelle ist nur mit einem hohen Aufwand möglich. Einfacher kann der Einfluss von geometrischen Toleranzen mit Hilfe des Kranmodells untersucht werden.

7.4.1 Einfluss geometrischer Toleranzen auf die Pendelschwingungen in der x - z -Koordinatenebene

Die geometrischen Toleranzen, die das Lastpendeln in der x - z -Koordinatenebene entscheidend beeinflussen, sind asymmetrische Tragseilabstände, eine ungleichmäßige Tragseilspannung und/oder eine Verlagerungen des Massenschwerpunktes gegenüber dem geometrischen Schwerpunkt. Aus diesem Grund werden die genannten Toleranzen mit Hilfe des Modellkrans einzeln voneinander untersucht, um den Einfluss der jeweiligen Toleranzen auf das Lastpendeln nach der Positionierung herauszufinden. Für die Durchführung der Untersuchungen werden die Steuerungsstrategie mit der geringsten Anzahl an Beschleunigungsintervallen (*Strategie 1*) und die Steuerungsstrategie mit der höchsten Anzahl an Schaltzeitpunkten (*Strategie 6*) eingesetzt. Die Schaltzeitpunkte der Steuerungsstrategien bleiben bei allen Versuchen unverändert. Ebenso wie bei den Modellversuchen zur Validierung der Simulationsmodelle werden die Versuche mit einer Tragseillänge von 1 und 1,5 m durchgeführt.

Die Ergebnisse der Modellversuche für unterschiedliche asymmetrische Tragseilabstände sind in der **Abb. 7.19** dargestellt. Bei den Versuchen werden ausgehend von einer parallelen Tragseilanordnung einzelne und mehrere Tragseilaufhängungspunkte an der Laufkatze verschoben. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass mit einer größeren Verlagerung einer Tragseilaufhängung auch die Auslenkung nach der Positionierung ansteigt. Einzige Ausnahme davon sind die Versuche mit einer Tragseillänge von 1,5 m und der Anwendung von *Strategie 1*.

Eine Verlagerung von zwei Tragseilaufhängungen um 30 mm führt nur bei den Versuchen mit einer Tragseillänge von 1 m und der Anwendung von *Strategie 6* zu einer weiter anwachsenden Auslenkung, im Vergleich zu den Versuchsergebnissen, bei denen eine Tragseilaufhängung um 30 mm verschoben ist. Bei der parallelen und der diagonalen Verlagerung von zwei Tragseilaufhängungen an gegenüber liegenden Seiten der Laufkatze entstehen Auslenkungen bei den Modellversuchen, die ebenso groß oder geringer sind als die Auslenkungen ohne die Verlagerung der Tragseilaufhängungen.

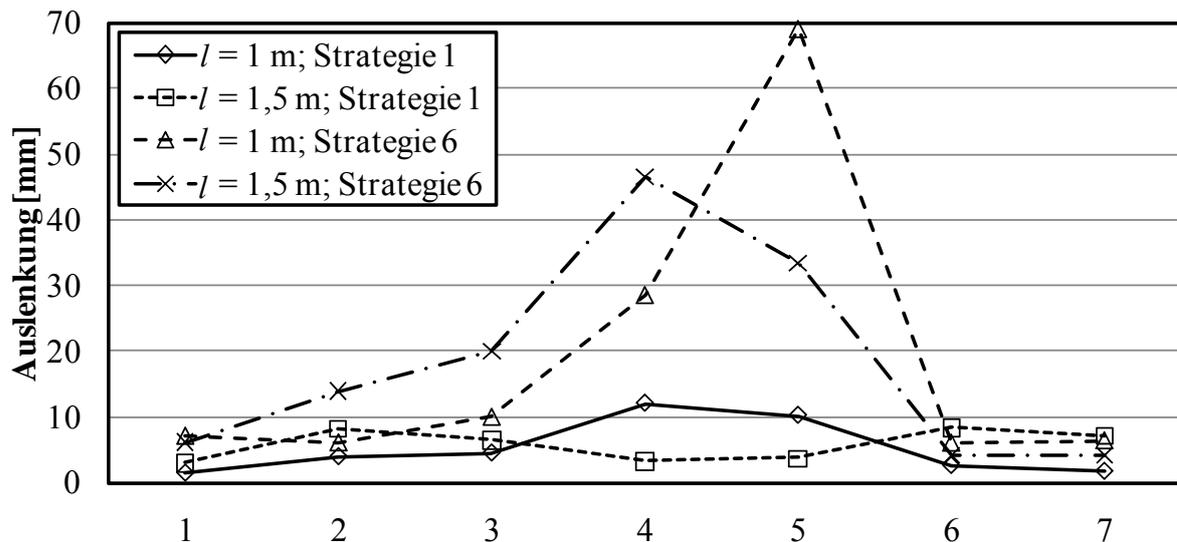


Abb. 7.19 Maximale Auslenkungen nach dem Verfahren bei der Verlagerung von einer oder zwei Tragseilaufhängungen im Modell und einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von $v_k = 263\text{ mm/s}$.

- 1: Ohne Verlagerung einer Tragseilaufhängung
- 2: Eine Tragseilaufhängung um 5 mm verschoben
- 3: Eine Tragseilaufhängung um 15 mm verschoben
- 4: Eine Tragseilaufhängung um 30 mm verschoben
- 5: Zwei Tragseilaufhängungen auf einer Seite der Laufkatze um 30 mm verschoben
- 6: Zwei Tragseilaufhängungen diagonal versetzt um 30 mm verschoben.
- 7: Zwei Tragseile parallel auf zwei Seiten um 30 mm verschoben.

Da bei der trapezförmigen Tragseilanordnung eine Verlagerung der Aufhängungspunkte vor allem die Tragseilspannung beeinflusst, wird dieser Einfluss nicht weiter untersucht. Die Ergebnisse der Modellversuche zur Untersuchung der Auswirkung von asymmetrischen Tragseilspannungen bei einer parallelen Tragseilanordnung und einer Verlagerung des Massenschwerpunkts außerhalb des geometrischen Schwerpunkts sind in der **Abb. 7.20** und **Abb. 7.21** dargestellt. Eine Nachbildung der asymmetrischen Tragseilspannung erfolgt in den Versuchen dadurch, dass die Verbindung zwischen einem Tragseil und dem LAM so weit gelöst wird, bis die Masse des LAM nur noch von den übrigen drei Tragseilen gehalten wird. Zur Verlagerung des Massenschwerpunkts wird eine kalibrierte 2 kg Masse am äußersten seitlichen Rand des LAM mittig zwischen den Tragseilen positioniert.

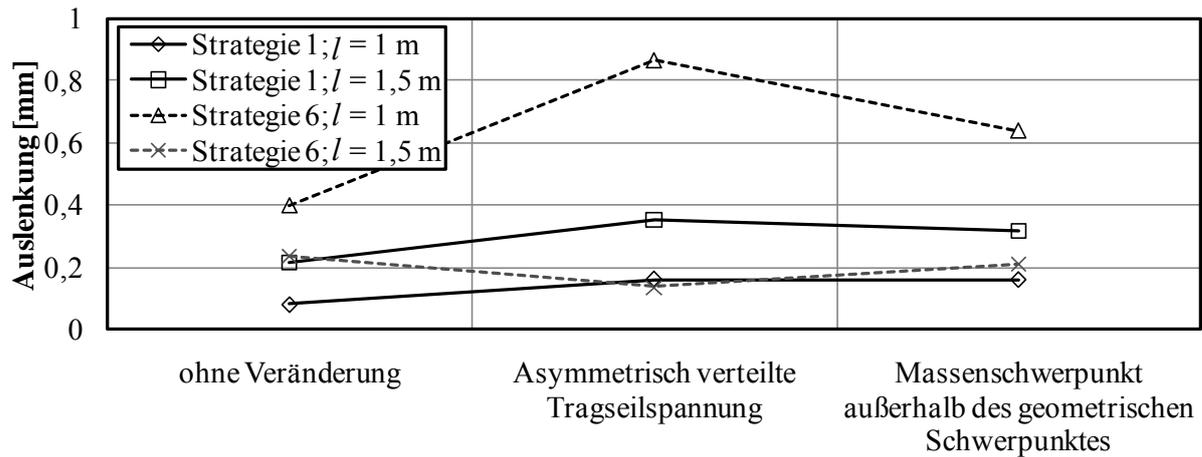


Abb. 7.20 Maximale Auslenkung nach dem Verfahren bei einer parallelen Trageilanordnung, einer Beeinflussung der Trageilbelastung und einer Verfahrensgeschwindigkeit von 263 mm/s

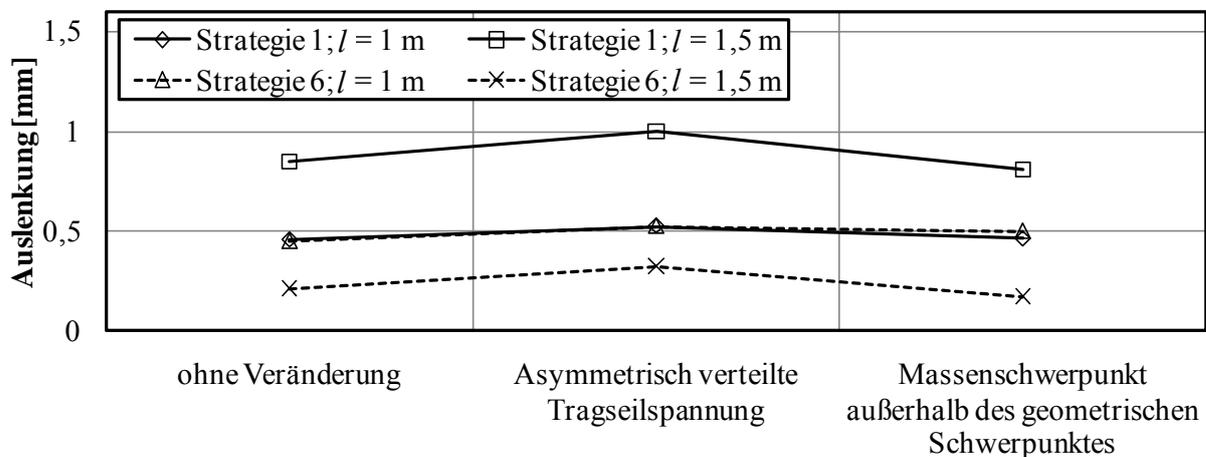


Abb. 7.21 Maximale Auslenkung nach dem Verfahren bei einer parallelen Trageilanordnung, einer Beeinflussung der Trageilbelastung und einer Verfahrensgeschwindigkeit von 526 mm/s

Eine Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt, dass die Auslenkungen nach dem Verfahren bei einer asymmetrischen Trageilspannung größer sind als bei einer Verlagerung des Massenschwerpunkts. Die einzige Ausnahme davon entsteht bei der Anwendung von *Strategie 6*, einer Verfahrensgeschwindigkeit von 263 mm/s und einer Trageillänge von 1,5 m. Im Durchschnitt sind die Auslenkungen bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 263 mm/s und einer ungleichmäßigen Trageilspannung um 92 % größer als die Auslenkungen ohne eine Beeinflussung der Trageilaufhängung. Bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 526 mm/s entstehen Auslenkungen, die entsprechend um durchschnittlich 25 % größer sind.

Die Diagramme in **Abb. 7.22** und **Abb. 7.23** zeigen die Ergebnisse der Modellversuche zur Untersuchung der Auswirkung von asymmetrischen Trageilspannungen und einer Verlagerung des Massenschwerpunkts außerhalb des geometrischen Schwerpunkts bei einer trapezförmigen Trageilanordnung. Im Gegensatz zu der parallelen Trageilanordnung entstehen die größten Auslenkungen bei der Verlagerung des Massenschwerpunkts außerhalb des geometrischen Schwerpunkts. Nur bei der Anwendung von *Strategie 6* und einer Trageillänge von 1,5 m entstehen unabhängig von der Verfahrensgeschwindigkeit die geringsten Auslenkun-

gen bei der Verlagerung des Massenschwerpunkts. Die maximalen Auslenkungen nach dem Verfahren sind bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 263 mm/s und einer Verlagerung des Massenschwerpunkts außerhalb des geometrischen Schwerpunkts um durchschnittlich 946 % größer als die Auslenkungen, die ohne eine Beeinflussung des Massenschwerpunkts im Modell entstehen. Bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 526 mm/s sind die durchschnittlichen Auslenkungen bei der Verlagerung des Massenschwerpunkts um 343 % größer.

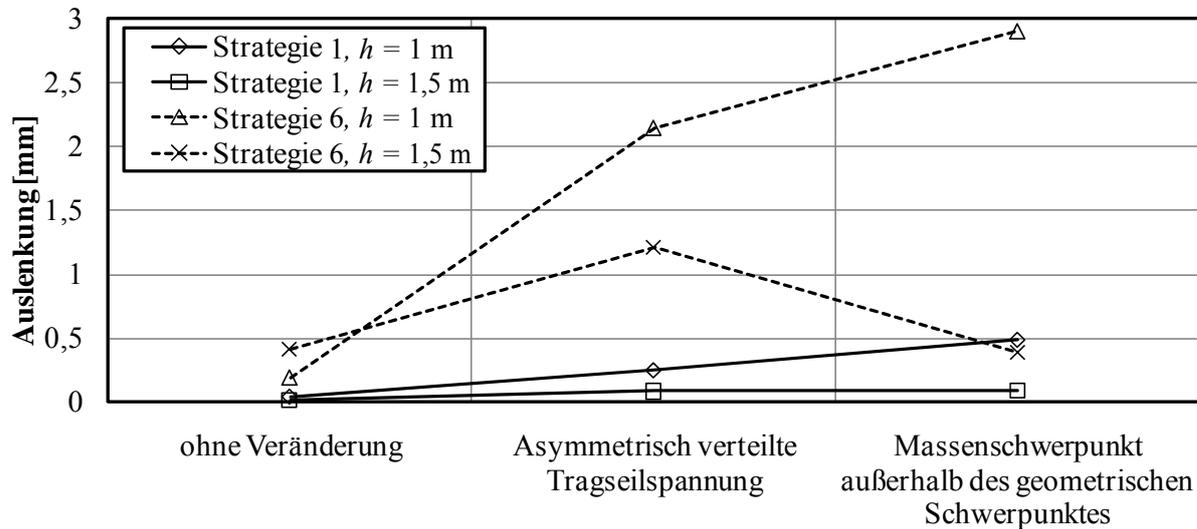


Abb. 7.22 Maximale Auslenkung nach dem Verfahren bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung, einer Beeinflussung der Tragseilbelastung und einer Verfahrgeschwindigkeit von 263 mm/s

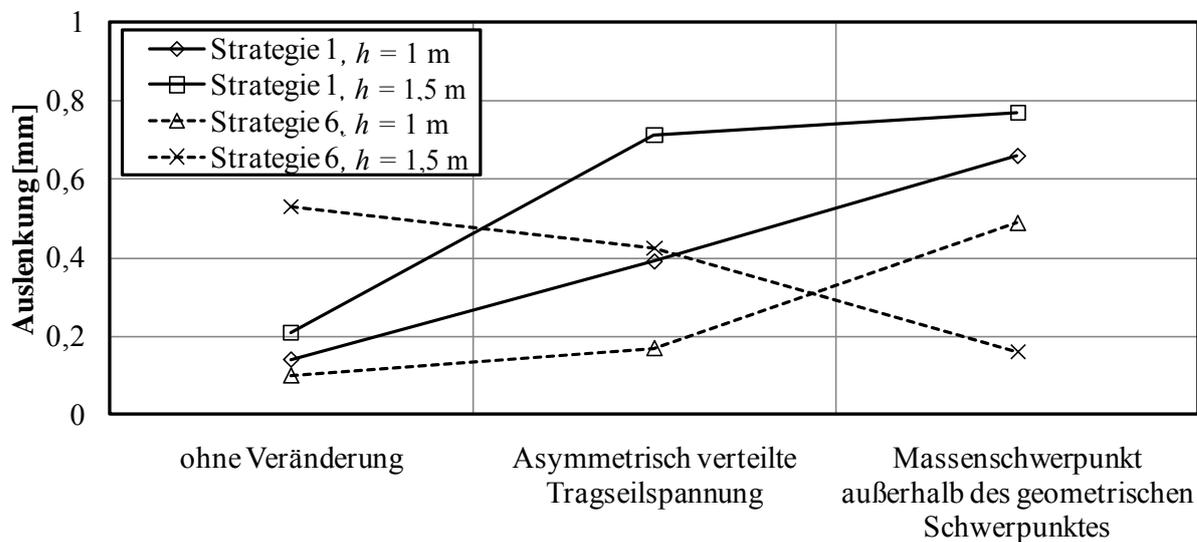


Abb. 7.23 Maximale Auslenkung nach dem Verfahren bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung, einer Beeinflussung der Tragseilbelastung und einer Verfahrgeschwindigkeit von 526 mm/s

7.4.2 Einfluss geometrischer Toleranzen auf das Lastpendeln in der x - y -Koordinatenebene

Neben der Beeinflussung des Lastpendelns in der x - z -Koordinatenebene entsteht ein zusätzliches Lastpendeln in der x - y -Koordinatenebene, wenn geometrische Toleranzen vorhanden sind. Dieses Lastpendeln in der x - y -Koordinatenebene kann dazu führen, dass das LAM mit Lagereinrichtungen kollidiert. Aus dem genannten Grund muss die Breite der Verfahrgasse des Parksystems so ausgelegt sein, dass Kollisionen auch dann nicht stattfinden können, wenn geometrische Toleranzen in dem Kransystem vorhanden sind.

Die Bestimmung der Amplituden des Lastpendelns in der x - y -Koordinatenebene kann am einfachsten mit dem Kranmodell durchgeführt werden. Dazu werden IR-Distanzsensoren an den vier Ecken des Modell-LAM montiert und mit Stellwänden eine Verfahrgasse simuliert. Mit Hilfe der IR-Distanzsensoren kann der Abstand zwischen dem LAM und den Stellwänden gemessen werden. Die **Abb. 7.24** zeigt das LAM mit den IR-Distanzsensoren.

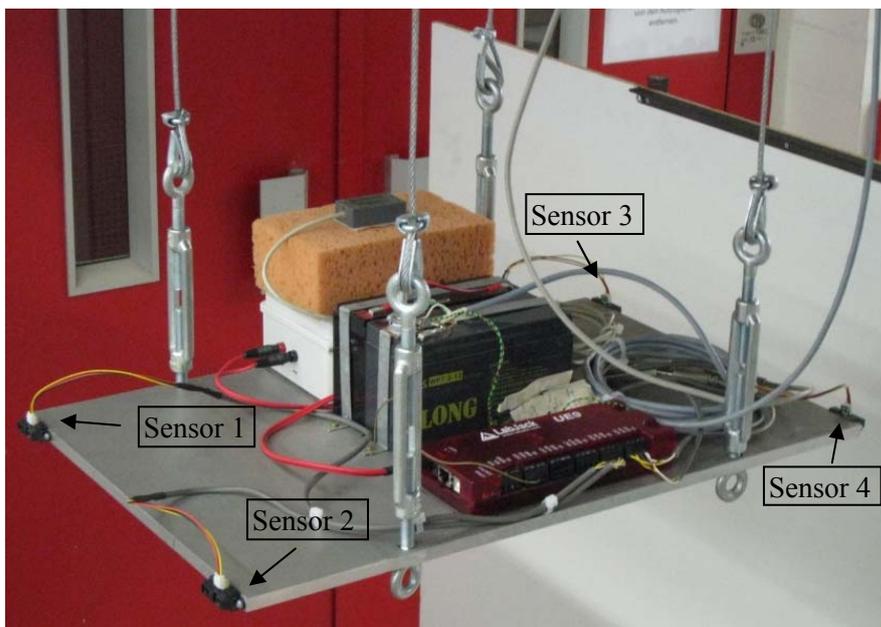


Abb. 7.24
*LAM mit
IR-Distanzsensoren*

Für die Festlegung der Verfahrgassenbreite ist vor allem die relative Veränderung des Abstandes zwischen dem LAM und den Stellwänden interessant. Damit eine Messung des relativen Abstands möglich ist, müssen vor jeder Versuchsdurchführung die Stellwände mit den IR-Distanzsensoren vermessen werden. Das Vermessen der Stellwände erfolgt in einem pendelfreien Zustand nach einem schrittweisen Verfahren. Auf der Grundlage der Vermessung wird schließlich für jeden Sensor der mittlere Abstand zur Stellwand bestimmt. Bei der Auswertung wird von den gemessenen Abständen beim Lastpendeln der mittlere Abstand im Ruhezustand subtrahiert. Der maximale Fehler, der bei dieser Methode der Auswertung entstehen kann, beträgt 10 mm.

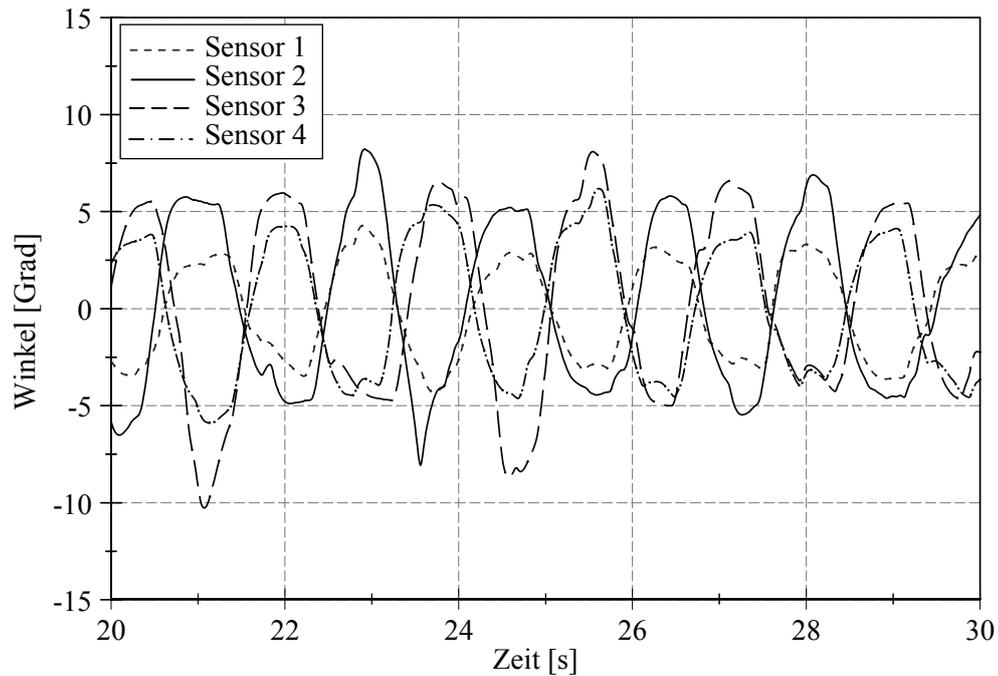


Abb. 7.25 Beispiel einer Messung, bei der nur Längsschwingungen vorhanden sind. Parameter der Messung: $l=1$ m; parallele Trageileanordnung; Strategie 6; $v_k = 263$ mm/s

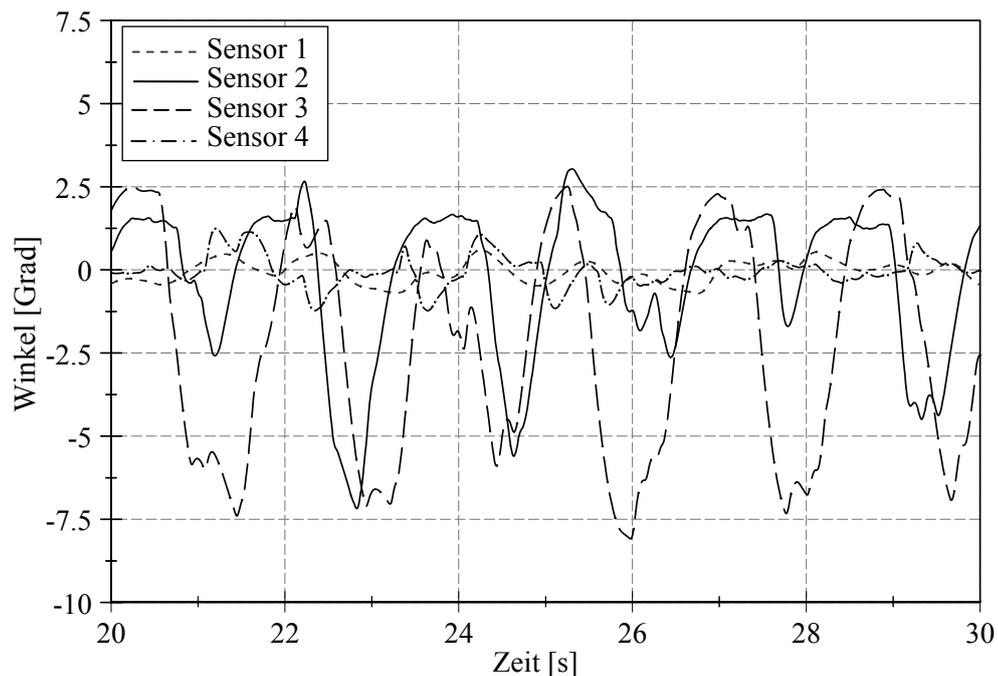


Abb. 7.26 Beispiel einer Messung, bei der Drehschwingungen vorhanden sind. Parameter der Messung: $l=1,5$ m; parallele Trageileanordnung; Strategie 1; $v_k = 263$ mm/s; Verlagerung des Massenschwerpunkts

In der **Abb. 7.25** und **Abb. 7.26** sind beispielhaft zwei Messergebnisse dargestellt. Die Sensoren 1 und 2 sowie die Sensoren 3 und 4 befinden sich jeweils auf einer Seite des LAM. Bei einer Schwingung in y -Koordinatenrichtung müssen die Phasen der Längsschwingungen, die von den Sensoren auf einer Seite des LAM gemessen werden, übereinstimmen (s. **Abb. 7.25**). Daraus folgt, dass die Längsschwingungen, die an der gegenüber liegenden Seite des LAM gemessen werden, um 180° phasenverschoben sind. Bei Drehschwingungen um die

z -Koordinatenachse sind die Schwingungen, die von den Sensoren auf einer Seite des LAM erfasst werden, um 180° phasenverschoben. Dem entsprechend müssen die gemessenen Schwingungen bei zwei diagonal gegenüber liegenden Sensoren die gleiche Phase besitzen (s. **Abb. 7.26**). Bei den meisten Modellversuchen treten sowohl Längsschwingungen als auch Drehschwingungen auf. Aufgrund des geringen Unterschieds zwischen den Schwingungsfrequenzen der Längs- und Drehschwingungen entstehen konstruktive oder destruktive Interferenzen.

Da das Lastpendeln in der x - y -Koordinatenebene im Wesentlichen von den geometrischen Toleranzen beeinflusst wird, erfolgt die Versuchsdurchführung mit den gleichen Steuerungsstrategien, Parametern und geometrischen Toleranzen, wie die Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Einflusses von geometrischen Toleranzen auf das Lastpendeln in der x - z -Koordinatenebene (vgl. Kap. 7.4). In der **Abb. 7.27** und **Abb. 7.28** sind die Ergebnisse der Versuchsdurchführung für unterschiedliche Trageisllängen dargestellt. Die minimale Auslenkung beträgt 1,6 mm. Als maximale Auslenkung wird eine Amplitude mit 14,87 mm gemessen. Insbesondere bei der Anwendung von *Strategie 6* entstehen Amplituden, die zum Teil deutlich größer sind als die Amplituden bei den übrigen Versuchsergebnissen.

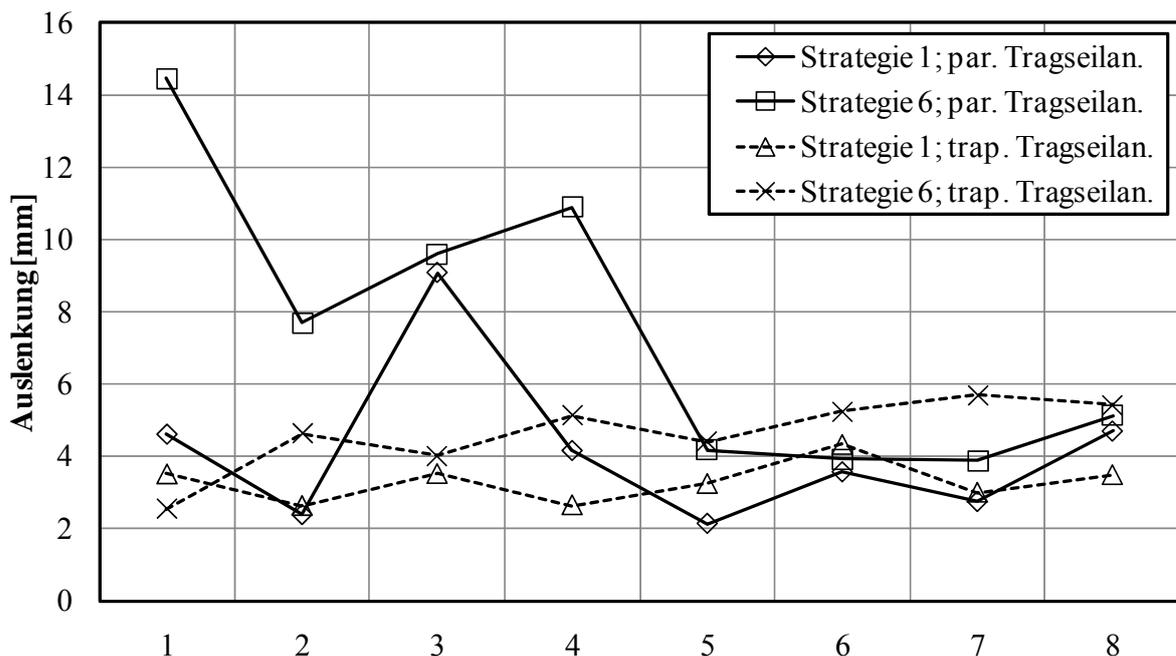


Abb. 7.27 Maximale Schwingungsauslenkungen in y -Koordinatenrichtung bei einer Trageisllänge von $l = 1$ m.

- 1: $v_K = 526$ mm/s 2: $v_K = 263$ mm/s 3: $v_K = 526$ mm/s und Verlagerung des Massenschwerpunkts
 4: $v_K = 263$ mm/s und Verlagerung des Massenschwerpunkts
 5: $v_K = 263$ mm/s, Verlagerung des Massenschwerpunkts und Beeinflussung der Trageislspannung
 6: $v_K = 526$ mm/s, Verlagerung des Massenschwerpunkts und Beeinflussung der Trageislspannung
 7: $v_K = 263$ mm/s und Beeinflussung der Trageislspannung
 8: $v_K = 526$ mm/s und Beeinflussung der Trageislspannung

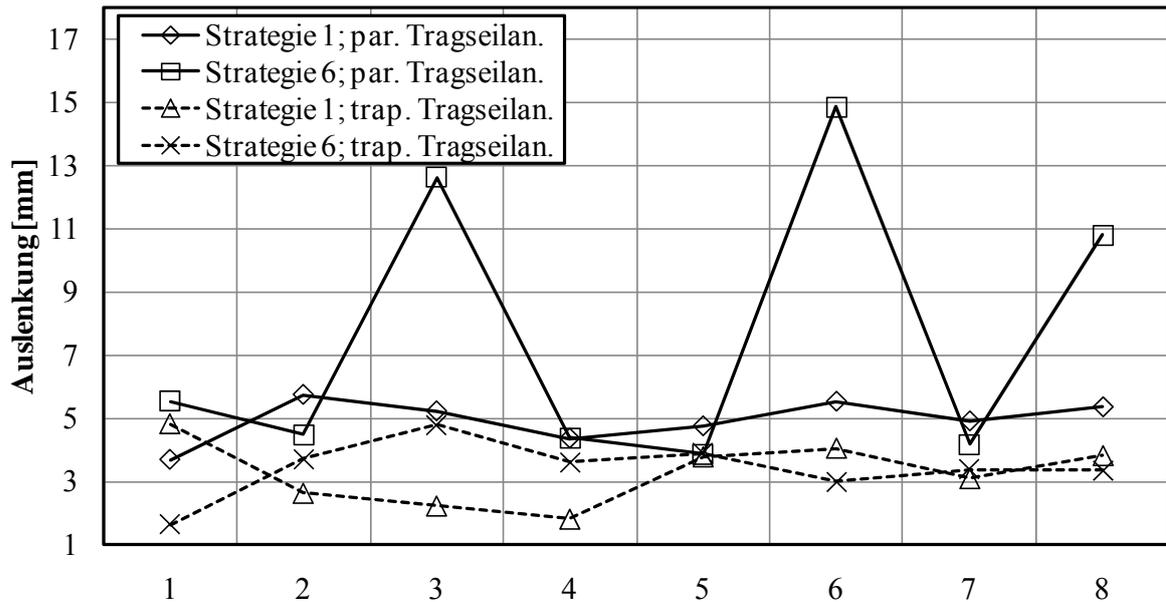


Abb. 7.28 Maximale Schwingungsauslenkungen in y -Koordinatenrichtung bei einer Tragseillänge von $l = 1,5$ m.

1: $v_K = 526 \text{ mm/s}^2$: $v_K = 263 \text{ mm/s}$ 3: $v_K = 526 \text{ mm/s}$ und Verlagerung des Massenschwerpunkts

4: $v_K = 263 \text{ mm/s}$ und Verlagerung des Massenschwerpunkts

5: $v_K = 263 \text{ mm/s}$, Verlagerung des Massenschwerpunkts und Beeinflussung der Tragseilspannung

6: $v_K = 526 \text{ mm/s}$, Verlagerung des Massenschwerpunkts und Beeinflussung der Tragseilspannung

7: $v_K = 263 \text{ mm/s}$ und Beeinflussung der Tragseilspannung

8: $v_K = 526 \text{ mm/s}$ und Beeinflussung der Tragseilspannung

Wie zu erwarten ist zeigt die Auswertung der Versuchsergebnisse, dass bei einer größeren Verfahrensgeschwindigkeit die Auslenkung tendenziell zunimmt. Bei der Anwendung einer trapezförmigen Tragseilanordnung werden im Durchschnitt geringere Auslenkungen erzielt als bei der parallelen Tragseilanordnung. Des Weiteren zeigen die Versuchsergebnisse, dass eine Verlagerung des Massenschwerpunkts größere Auslenkungen produziert als eine ungleichmäßige Tragseilspannung.

Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse und der Ähnlichkeitsbeziehung aus Gl. 7.1 kann die Verfahrgassenbreite näherungsweise bestimmt werden. Ausgehend von der maximalen Auslenkung in den Modellversuchen und einer Multiplikation dieses Werts mit einem Sicherheitsfaktor von $S = 2$ sollte der maximale Abstand zwischen den Stirnseiten des LAM und den Lagereinrichtungen jeweils 298 mm betragen. Dieser maximale Sicherheitsabstand kann verringert werden, wenn ausschließlich die *Strategie 1* angewendet wird. Bei einer parallelen Tragseilanordnung bewirkt eine Reduzierung der maximalen Verfahrensgeschwindigkeit auf 50 m/min, dass der minimale Sicherheitsabstand auf 115 mm reduziert werden kann. Der Einsatz einer trapezförmigen Tragseilanordnung ermöglicht bei einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von 100 m/min einen minimalen Abstand von 97 mm zwischen den Stirnseiten des LAM und den Lagereinrichtungen.

Zur Validierung der berechneten Sicherheitsabstände wurden im Anschluss an die Modellexperimente die Stellwände entsprechend der ermittelten Verfahrgassenbreite gegenüber den Stirnseiten des LAM aufgestellt. Im Anschluss daran wurden die Modellexperimente mit den größten Auslenkungen wiederholt. Bei den Versuchen sind keine Kollisionen mit den Stellwänden aufgetreten.

7.5 Zusammenfassung zur Validierung

Ziel der Validierung in dieser Arbeit ist die qualitative Beurteilung der entwickelten Simulationsmodelle. Zu diesem Zweck wurde ein Kranmodell im Maßstab 1:10 entwickelt und am Fachgebiet Maschinenelemente aufgebaut. Neben der Validierung ermöglicht das Kranmodell eine Untersuchung des Einflusses von geometrischen Toleranzen auf das Lastpendeln in mehreren Koordinatenebenen.

Bei den Versuchen zur Validierung der Simulationsergebnisse mit einer konstanten und einer variablen Trageillänge entstehen in den Modellversuchen bei der Anwendung einer parallelen und einer trapezförmigen Trageilanordnung erwartungsgemäß größere Auslenkungen nach dem Verfahren als in der Simulation. Dem gegenüber werden bei einer parallelen Trageilanordnung während dem Verfahren zum Teil geringere Auslenkungen erreicht. Bei dem Einsatz von trapezförmigen Trageilanordnungen sind die maximalen Auslenkungen während des Verfahrens in den Modellversuchen meist größer.

Die Abweichungen zwischen den Auslenkungen bei den Modellversuchen und den Simulationen entstehen insbesondere dadurch, dass mit dem entwickelten Kranmodell nicht alle Eigenschaften eines realen Krans nachgebildet werden können. Vor allem die Realisierung der Beschleunigungssteuerung kann mit dem Kranmodell nicht maßstäblich wiedergegeben werden. Durch die Implementierung der Steuerungsstrategien in die Steuerung des Kranmodells entstehen bei dem Verfahren der Laufkatze ruckartige Beschleunigungen, die ein Lastpendeln anregen. Darüber hinaus bewirken Reibungseinflüsse an der Trageilaufhängung und -führung eine Dämpfung des Lastpendelns. Diese Reibungseinflüsse sind konstruktionsbedingt und können nicht mit Ähnlichkeitsbeziehungen an einen realen Kran angepasst werden.

Insgesamt zeigen die Versuche mit einer konstanten und einer variablen Trageillänge, dass die entsprechenden Modelle qualitativ korrekt sind. Die Messergebnisse aus den Modellversuchen geben einen Aufschluss darüber, welche maximalen Auslenkungen unter ungünstigen Bedingungen bei einem Kran entstehen können. Dem gegenüber zeigen die Simulationsergebnisse, welche Lastpendelausschläge unter normalen Bedingungen erwartet werden müssen.

Da eine Untersuchung der Auswirkung von geometrischen Toleranzen auf das Lastpendeln in der x - z -Koordinatenebenen und der x - y -Koordinatenebenen mit den Simulationsmodellen nicht möglich ist, wurde diese Untersuchung ebenfalls mit Hilfe des Kranmodells durchgeführt. Zur Versuchsdurchführung wurden unterschiedliche geometrische Toleranzen, wie z.B. eine Verlagerung des Massenschwerpunkts oder die Verlagerung von einzelnen Trageilaufhängungen, angewendet. Wie zu erwarten ist zeigen die Untersuchungen, dass das Lastpendeln negativ durch geometrische Toleranzen beeinflusst wird.

Bei der Durchführung von Modellversuchen mit der Verlagerung von Trageilaufhängungen entstehen bis zu 298 % (*Strategie 1*) und 663 % (*Strategie 6*) größere Auslenkungen in der x - z -Koordinatenebene, wenn eine einzelne Trageilaufhängung verschoben wird. Die Anwendung einer ungleichmäßig verteilten Trageilspannung bewirkt bei der parallelen Trageilanordnung eine größere Auslenkung nach der Positionierung in der x - z -Koordinatenebene als die Verlagerung des Massenschwerpunkts. In Abhängigkeit der Verfahrensgeschwindigkeit sind die Auslenkungen nach dem Verfahren um 95 % (263 mm/s) oder 25 % (526 mm/s) größer als bei den Modellversuchen ohne geometrische Toleranzen. Dem gegenüber erzeugt eine Verlagerung des Massenschwerpunkts bei der trapezförmigen Trageilanordnung größere Auslenkungen in der x - z -Koordinatenebene als eine ungleichmäßige Trageilspannung. Die Auslenkungen sind dabei um durchschnittlich 946 % (263 mm/s) und 343 % (526 mm/s) größer.

Das Lastpendeln in der x - y -Koordinatenebene entsteht ausschließlich infolge von geometrischen Toleranzen. Die größte Auslenkung in y -Koordinatenrichtung, die in den Modellversuchen gemessen wird, ist 14,87 mm groß. Den größten negativen Einfluss auf das Lastpendeln in der y -Koordinatenrichtung bewirkt i.Allg. die Verlagerung des Massenschwerpunkts, wodurch das LAM zu Drehschwingungen angeregt wird. Durch den Einsatz einer trapezförmigen Trageilanordnung können die Auslenkungen in y -Koordinatenrichtung reduziert werden.

Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse und der Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwerts kann in einem realen Kransystem der maximale Abstand zwischen einer Stirnseiten des LAM und den Lagereinrichtungen mit 298 mm festgelegt werden. Die Anwendung von *Strategie 1*, einer parallelen Trageilanordnung und einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von 50 m/min, ermöglicht einen minimalen Abstand zwischen den Stirnseiten des LAM und den Lagereinrichtungen von 115 mm. Bei dem Einsatz einer trapezförmigen Trageilanordnung und der *Strategie 1* ist dieser Mindestabstand auch bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 100 m/min möglich.

8 Systematische Entwicklung einer Positionierungsvorrichtung

Ein wesentlicher Nachteil der Lastpendeldämpfung durch die Anwendung von Steuerungsstrategien sind Restschwingungen nach der Positionierung. Diese unvermeidlichen Restschwingungen verhindern eine lastpendelfreie Positionierung. Für den Einsatz von automatisierten Kranen in Lagersystemen wird daher eine Positionierungsvorrichtung benötigt, die vorhandene Schwingungen nach der Positionierung schnell eliminiert und eine exakte Ausrichtung des LAM zu einem Lagerplatz ermöglicht. Eine notwendige Nebenfunktion der Positionierungsvorrichtung ist die Fixierung des LAM während dem Be- und Entladevorgang. Durch die Fixierung soll verhindert werden, dass das LAM während der Be- und Entladung zu Schwingungen angeregt wird.

8.1 Ausgangsbedingungen

Die durchgeführten Simulationen und Modellexperimente haben gezeigt, dass eine lastpendelfreie Positionierung des LAM bei der Anwendung von Steuerungsstrategien nicht möglich ist. Insbesondere bei vorhandenen geometrischen und kinematischen Toleranzen entstehen Auslenkungen nach der Positionierung, die von den Steuerungsstrategien nicht kompensiert werden können. Besonders empfindlich auf Toleranzen reagieren die Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich. Da diese Steuerungsstrategien allerdings die kürzesten Positionierungszeiten ermöglichen, ist der Einsatz in realen Systemen anzustreben.

Die Simulationsergebnisse aus Kap. 6 verdeutlichen, dass die Anwendung von *Strategie 5* geringere Auslenkungen nach der Positionierung erzeugt als die Anwendung von *Strategie 6*. Dabei sind die Positionierungszeiten bei der Anwendung von *Strategie 5* nur geringfügig länger. Darüber hinaus haben die Simulationsergebnisse ergeben, dass eine trapezförmige Tragseilanordnung keine signifikante Reduzierung der Auslenkung nach der Positionierung ermöglicht. Aus den genannten Gründen werden die Simulationsergebnisse mit den maximalen Auslenkungen, die bei der Anwendung von *Strategie 5* und einer parallelen Tragseilanordnung entstehen, zur Entwicklung der Positionierungsvorrichtung ausgewählt.

In dem Diagramm in **Abb. 8.1** sind die Simulationsergebnisse bei der Anwendung von *Strategie 5*, einer parallelen Tragseilanordnung, und einer Senkbewegung von 20 m dargestellt. Bei dieser Parametereinstellung werden in der Simulation die größten Auslenkungen nach der Positionierung erzeugt. Die Auswertung der Simulationsergebnisse ergibt, dass die maximale Auslenkung nach der Positionierung in y -Koordinatenrichtung 1317 mm beträgt und das LAM mit maximal $0,58 \text{ m/s}^2$ beschleunigt wird.

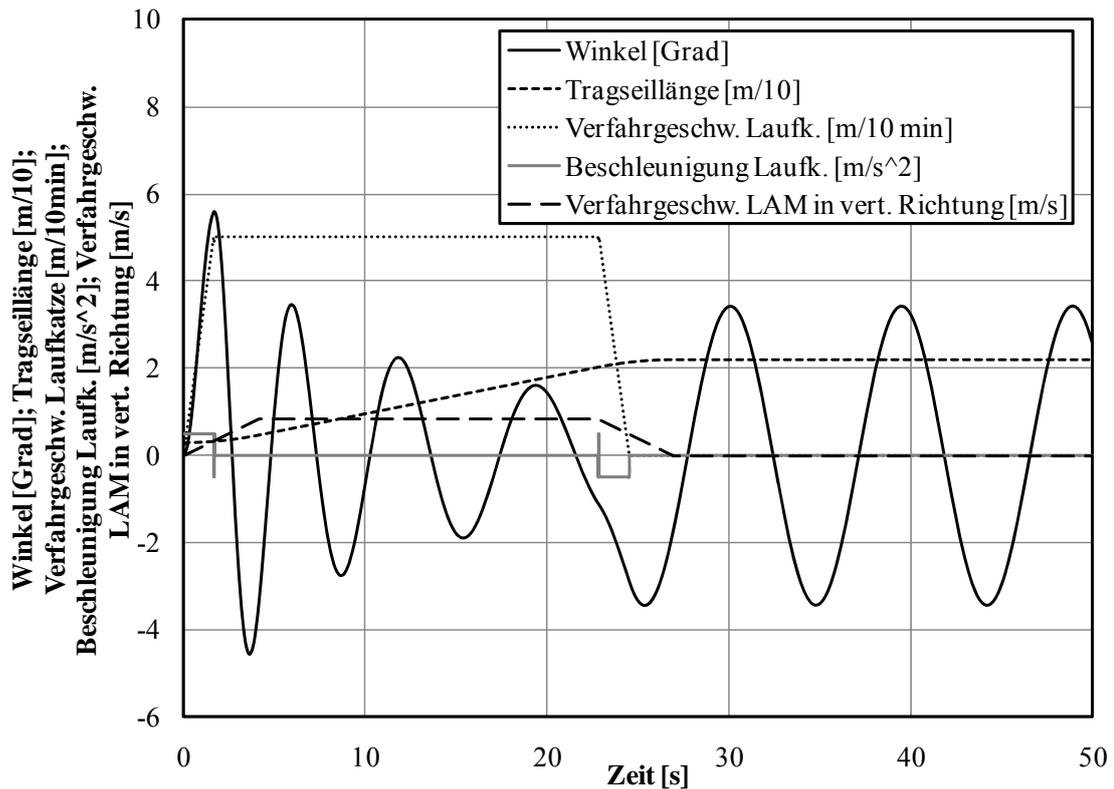


Abb. 8.1 Simulationsergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5, einer parallelen Tragsseilanordnung mit einer Senkbewegung von 20 m, einer Senkgeschwindigkeit von 50 m/min und einer Senkbeschleunigung von $0,2 \text{ m/s}^2$.

Neben dem Einsatz eines automatisierten Krans kann eine weitere Einsparung von Investitionskosten für automatische Parksyste me erreicht werden, indem standardisierte Container mit einer Länge von 20' für die Lagerung der PKWs und Güter eingesetzt werden. Die Vorteile, die durch eine Nutzung von standardisierten Containern entstehen, sind eine Reduzierung der Stahl- und Gebäudebaukosten. Darüber hinaus kann die Bauzeit entscheidend verkürzt werden.

Prozesskettenanalysen von automatischen Parksyste men haben gezeigt, dass der Einsatz von Rollpaletten zur Handhabung der PKWs in Kombination mit einem Doppel-LAM die wirtschaftlichste Lösung mit der höchsten Leistungsfähigkeit ist /FIT01/. Durch den Einsatz eines Doppel-LAM sind zusätzliche Palettenspeicher überflüssig. Nicht belegte Paletten werden in freie Lagerplätzen bzw. Containern gelagert. Bei einem Ein- oder Auslagerungsvorgang erfolgt ein Wechsel von belegten und nicht belegten Paletten (oder umgekehrt) mit dem Doppel-LAM. Zu diesem Zweck besitzt das Doppel-LAM zwei Ebenen für den gleichzeitigen Transport von belegten und nicht belegten Paletten.

Die Rollpaletten sind bereits vorhanden und besitzen eine Masse von 500 kg. Für die zu transportierenden PKWs wird eine maximale Masse von 2.500 kg vorausgesetzt. Im vollbeladenen Zustand wird die Masse des LAM mit schätzungsweise 8.000 kg festgelegt.

8.2 Funktionsstruktur der Positionierungsvorrichtung

Die Hauptfunktion der Positionierungsvorrichtung ist die Begrenzung der Pendelbewegung des LAM nach dem Verfahren der Laufkatze. Diese Hauptfunktion besteht im Wesentlichen aus den Teilfunktionen „Positionierung horizontal/vertikal“ und „Energie wandeln“. Darüber hinaus ist die Teilfunktion „LAM fixieren“ für die Erfüllung der Gesamtfunktion notwendig. In der **Abb. 8.2** ist die Funktionsstruktur zur Entwicklung der Positionierungsvorrichtung dargestellt. Der Stofffluss ist dabei die Pendelbewegung des LAM.

Die Funktion „Positionierung horizontal/vertikal“ soll eine exakte Ausrichtung des LAM nach dem Verfahren der Laufkatze ermöglichen. Während dem Verfahren der Laufkatze darf diese Funktion die Bewegung des LAM nicht behindern und muss dem entsprechend durch eine zusätzliche Funktion deaktiviert bzw. nach dem Verfahren aktiviert werden. Parallel zur horizontalen Positionierung muss die kinetische Energie des LAM in eine Energieform gewandelt werden, die keine weiteren Pendelbewegungen verursacht und für das gesamte System unschädlich ist. Damit die Forderung nach einer schnellen Positionierung erfüllt werden kann, sollten die Positionierungsvorgänge und die Funktion „Energie wandeln“ zur gleichen Zeit beendet sein. Für die Entwicklung der Positionierungsvorrichtung wird davon ausgegangen, dass die gewandelte Energie das System ungenutzt verlässt.

Die Fixierung der Position des LAM nach der Begrenzung der Bewegung ist erforderlich, um zu verhindern, dass sich die Position des LAM während dem Be- und Entladevorgang ändert. Eine Änderung der vertikalen Position des LAM kann durch unterschiedliche Dehnungen der Tragseile bei dem Be- und Entladevorgang entstehen. Darüber hinaus können Stöße bei dem Be- und Entladevorgang entstehen, die eine Bewegung des LAM in horizontaler und vertikaler Richtung anregen.

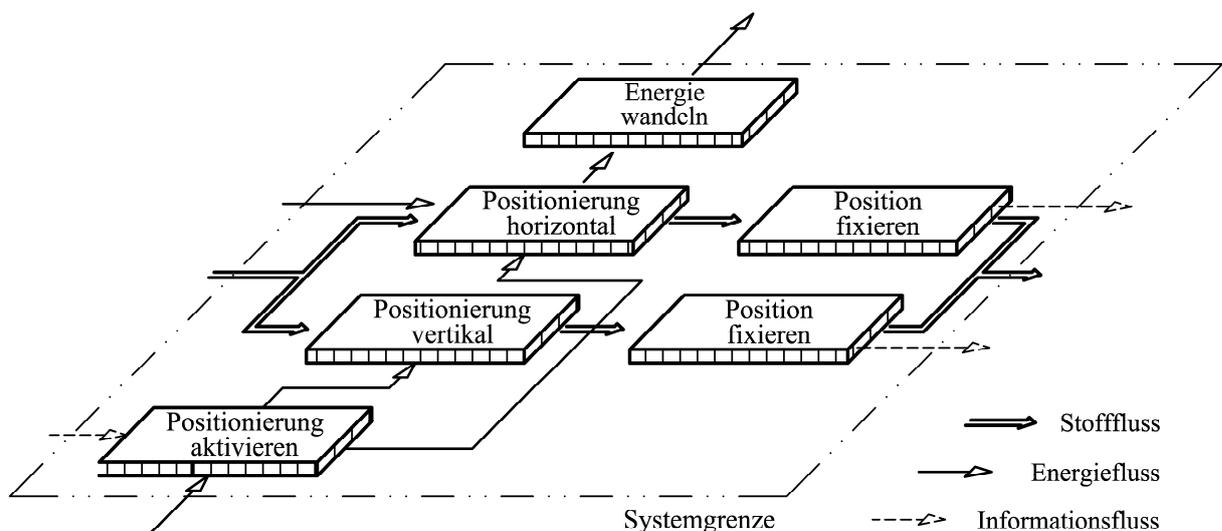


Abb. 8.2 Funktionsstruktur der Positionierungsvorrichtung

8.3 Entwicklung von Prinziplösungen

Bevor prinzipielle Lösungsvarianten entwickelt werden können, müssen Wirkprinzipien für die Teilfunktionen einer Funktionsstruktur ermittelt werden. Die Wirkprinzipien ermöglichen eine Umsetzung der Teilfunktionen in ein physikalisches Wirkgeschehen /KÜN05/. Bei der Funktionsstruktur der Positionierungsvorrichtung (s. **Abb. 8.2**) ist die Funktion „Energie wandeln“ die eigenschaftsbestimmende Teilfunktion. Da die Teilfunktion „Energie wandeln“ in zahlreichen Konstruktionen benötigt wird, erfolgt die Festlegung von Wirkprinzipien mit Hilfe des Konstruktionskatalogs „Wandeln der Energie- bzw. Signalart“ von Koller /KOL98/. Bei den übrigen Teilfunktionen ist eine Ermittlung von Wirkprinzipien nicht notwendig, da die Wirkungsweise dieser Funktionen vor allem durch die Wirkgeometrie beeinflusst wird. Die Teilfunktionen „Position horizontal/vertikal“ sollen nach Möglichkeit so durchgeführt werden, dass keine weiteren Funktionselemente zur Fixierung der Position des LAM benötigt werden. Für die Teilfunktion „Positionierung aktivieren“ beschränken sich die Lösungsvarianten auf die Auswahl eines geeigneten Antriebs und die Anzahl der Antriebe.

Zur systematischen Entwicklung von prinzipiellen Lösungsvarianten wird die Methode des morphologischen Kastens angewendet. In der **Tab. 8.1** ist der morphologische Kasten für die Entwicklung der Positionierungsvorrichtung dargestellt. Zu jeder Teilfunktion sind in dem morphologischen Kasten entsprechende physikalische Wirkprinzipien oder mögliche Wirkgeometrien aufgelistet. Durch die Kombination der Lösungsprinzipien werden schließlich Lösungsvarianten entwickelt.

Die Wirkprinzipien für die Teilfunktion „Energie wandeln“ sind unterteilt in Wirkprinzipien, bei denen die kinetischen Energie des LAM in eine mechanische, fluidische, thermische oder eine elektrische Energieform gewandelt wird. Dabei wird eine physikalische Eingangsgröße mit Hilfe eines physikalischen Effekts in eine andere physikalische Ausgangsgröße gewandelt. Bei der mechanischen Energiewandlung wird z.B. durch eine Krafteinwirkung die Länge eines Gegenstands, infolge der plastischen Verformung, in eine Länge bzw. Längenänderung gewandelt.

Für die Auswahl eines geeigneten Wirkprinzips sind vor allem die Stärke des Wirkeffektes und der Aufwand zur Realisierung von Bedeutung. Wirkprinzipien wie z.B. der Elektrokinetische-Effekt (1.4.2 in **Tab. 8.1**) oder der Piezo-Effekt (1.4.4 in **Tab. 8.1**) eignen sich aufgrund ihrer geringen Wirkstärke nur bedingt zur Reduzierung der Pendelbewegung des LAM. Der Realisierungsaufwand eines Wirkeffektes wird durch die Eigenschaften und die Anzahl der benötigten Wirkelemente bestimmt. In Abhängigkeit des Wirkprinzips sind Hilfsenergien oder zusätzliche Energiewandlungen für die Realisierung notwendig. Bei der Anwendung des Wirkprinzips „Wirbelstrom“ (1.1.4 und 1.3.1 in **Tab. 8.1**) wird z.B. oftmals ein Strom als Hilfsenergie benötigt, um ein Magnetfeld zu erzeugen.

| Lfd. Nr. | Teilfunktion | Physikalischer Effekt / geometrisches Merkmal | Wirkprinzip | | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------------------------|---|-----------------|----------------------|---------|------------------|--------|------------------|-------|-------|-------|---|-------|--|--|
| 1 | Energie wandeln | Mech. in Mech. | 1.1.1 | | 1.1.2 | | 1.1.3 | | 1.1.4 | | 1.1.5 | | 1.1.6 | | |
| | | | Mech. in Fluid. | 1.2.1 | | 1.2.2 | | 1.2.3 | | | | | | | |
| | | Mech. in Therm. | | Bernoulli | | Boyle-Mariotte | | Turbulenz | | | | | | | |
| | | | 1.3.1 | | 1.3.2 | | 1.3.3 | | 1.3.4 | | 1.3.5 | | | | |
| | | Mech. in Elektr. | | Reibung | | Wirbelstrom | | Turbulenz | | | | | | | |
| | | | | 1.4.1 | | 1.4.2 | | 1.4.3 | | 1.4.4 | | | | | |
| | | | | Induktion | | Elektrokin.-Eff. | | Elektrodyn.-Eff. | | | | | | | |
| | | | | 2.1.1 | elektr. | 2.1.2 | pneum. | 2.1.3 | hydr. | 2.1.4 | chem. | | | | |
| | | 2 | Pos. aktivieren | Anzahl der Antriebe | 2.2.1 | 1 | 2.2.2 | 2 | 2.2.3 | 3 | 2.2.4 | 4 | | | |
| | | | | Anzahl der Anschläge | 3.1.1 | 1 | 3.1.2 | 2 | 3.1.3 | 3 | 3.1.4 | 4 | | | |
| 3 u. 4 | Pos hor. (3) Pos. vert. (4) | Bewegung der Anschläge | 3.2.1 | rotatorisch | 3.2.2 | linear | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

Tab. 8.1 Morphologischer Kasten zur Entwicklung von Prinziplösungen für die Positionierungsvorrichtung (Wirkprinzipien in Anlehnung an /KOL98/)

Unter der Berücksichtigung der Stärke des Wirkeffekts und dem Aufwand zur Realisierung wird in einer Vorauswahl festgelegt, dass die Wirkprinzipien „Reibung“ (1.3.1 in **Tab. 8.1**), „Induktion“ (1.4.1 in **Tab. 8.1**) und „Wirbelstrom“ (1.1.4 in **Tab. 8.1**) am besten dazu geeignet sind, die kinetische Energie der Pendelbewegung zu wandeln. Die Wirkprinzipien „Strömungswiderstand“ (1.1.5 in **Tab. 8.1**) und „Impuls“ (1.1.2 in **Tab. 8.1**) werden ebenfalls bei der Ermittlung von Prinziplösungen berücksichtigt. Nachteile dieser Wirkprinzipien sind allerdings die aufwendige Steuerung des Wirkeffekts.

Das Wirkprinzip „Reibung“ kann in verschiedene Reibungsarten (z.B. Festkörperreibung, Flüssigkeitsreibung usw.) untergliedert werden. Die Reibungsarten unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Abhängigkeit der Wirkstärke von der Beanspruchungsgeschwindigkeit. Bei der Entwicklung von Konzeptvarianten erfolgt zunächst keine Differenzierung der Reibungsarten.

Das Wirkprinzip „Induktion“ ermöglicht eine Energiewandlung, indem die kinetische Energie der Pendelbewegung mit Hilfe eines Generators in eine Spannung gewandelt wird. Die gewandelte elektrische Energie kann gespeichert werden oder muss über elektrische Widerstände in Wärme gewandelt werden. Bei dem physikalischen Effekt „Wirbelstrom“ werden in einem elektrisch leitfähigen Material Wirbelströme erzeugt, sobald sich ein Magnet relativ zu diesem Material bewegt. Die Wirbelströme erzeugen wiederum ein magnetisches Gegenfeld und hemmen somit nach der *Lenzschen* Regel die Relativbewegung /HER99/.

In der **Abb. 8.3** bis **Abb. 8.13** sind Prinziplösungen dargestellt, die mit Hilfe des morphologischen Kastens ermittelt wurden und zur Erfüllung der Gesamtfunktion am besten geeignet sind. Da bei den meisten Prinziplösungen die Funktionen „Positionierung horizontal“ und „Positionierung vertikal“, sowie die entsprechenden Fixierungen von einem Bauteil (i.d.R. ein biegesteifer Träger) erfüllt werden, wird auf eine zusätzliche Darstellung der vertikalen Positionierungsvorrichtungen in den Darstellungen verzichtet.

Die meisten Prinziplösungen entstehen bei der Anwendung des Wirkprinzips „Reibung“. In den Prinzipskizzen *I* bis *V* (s. **Abb. 8.3** bis **Abb. 8.7**) wird die Flüssigkeitsreibung (schematisch dargestellt durch einen Kolben in einem Zylinder) als Wirkprinzip zur Energiewandlung verwendet. Um zu hohen Beschleunigungen und abrupte Bewegungsänderungen zu vermeiden, wird neben der Flüssigkeitsreibung zur Energiewandlung oftmals parallel zu dem Reibungselement eine Feder als Energiespeicher eingesetzt. Durch die Kombination von einem Element zur Energiewandlung und –speicherung wird eine Dämpfung der Schwingungsbewegung erreicht. Die horizontale und die vertikale Positionierung erfolgt bei den Prinzipskizzen *I* bis *V* durch Anschläge, die als biegesteife Träger ausgeführt sind und ausgeschwenkt oder linear bewegt werden.

Bei den Prinziplösungen *VI* und *VII* (s. **Abb. 8.8** und **Abb. 8.9**) wird die Festkörperreibung zur Energiewandlung eingesetzt. Im Unterschied zu den Prinziplösungen *I* bis *V* erfolgt die Positionierung nicht durch ein separates Bauteil, sondern wird direkt von den Wirkelementen

für die Energiewandlung übernommen. Zur vertikalen Positionierung und Fixierung sind zusätzliche Elemente notwendig, die nach der horizontalen Positionierung durch eine Schwenk- oder Linearbewegung ausgefahren werden und eine vertikale Positionierung ermöglichen. Da ein direkter Kontakt zwischen den Wirkelementen und den Containern notwendig ist, müssen die Container entsprechend modifiziert werden.

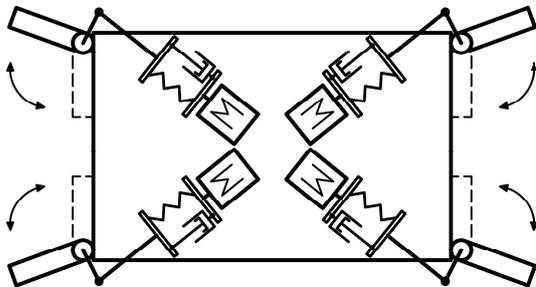


Abb. 8.3 Prinzipslösung I; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.1-2.2.4-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1

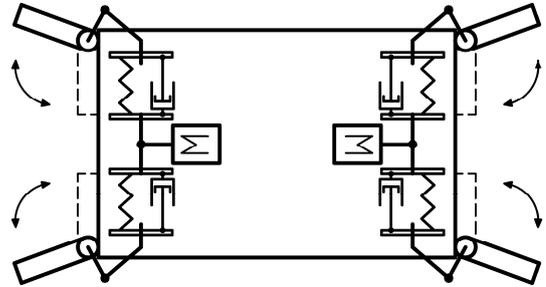


Abb. 8.4 Prinzipslösung II; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.1-2.1.2-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1

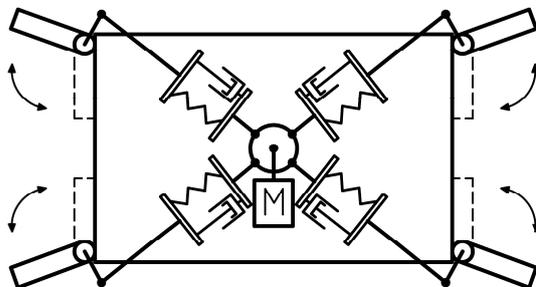


Abb. 8.5 Prinzipslösung III; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.1-2.2.1-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1

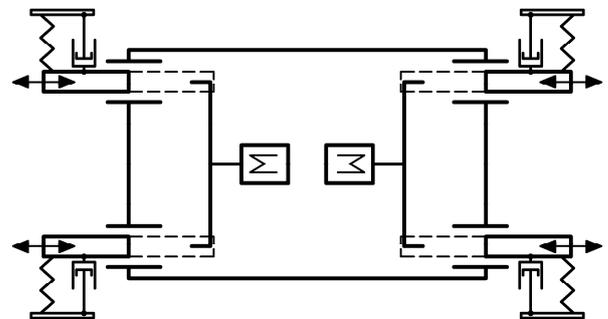


Abb. 8.6 Prinzipslösung IV; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.2-2.2.2-3.1.4-3.2.2-4.1.4-4.2.2

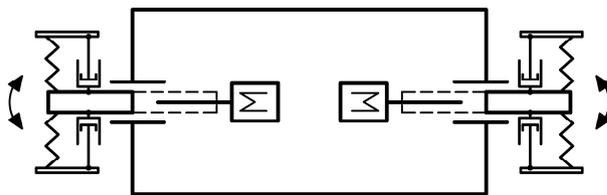


Abb. 8.7 Prinzipslösung V; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.2-2.2.2-3.1.2-3.2.2-4.1.2-4.2.2

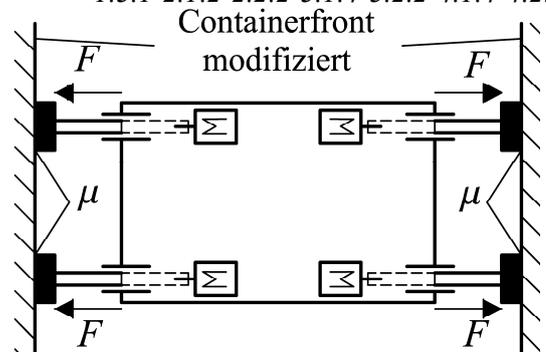


Abb. 8.8 Prinzipslösung VI; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.3-2.2.4-3.1.4-3.2.2-4.1.4-4.2.2

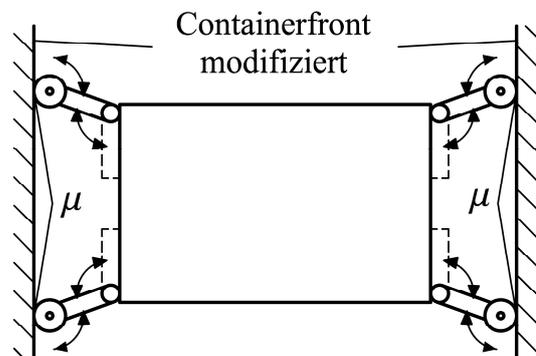


Abb. 8.9 Prinzipslösung VII; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.3-2.2.4-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1

Die Prinzipskizze VIII (s. **Abb. 8.10**) zeigt, wie durch die Anwendung des Wirkprinzips „Induktion“ eine Energiewandlung ermöglicht werden kann. Zur Positionierung werden bei dieser Prinziplösung ebenfalls Anschläge eingesetzt, die rotatorisch oder linear bewegt werden. Im Vergleich zu den Prinziplösung III werden bei der Anwendung des Wirkprinzips „Induktion“ der Motor durch einen Generator ersetzt und die Reibungs- und Feder Elemente entfernt.

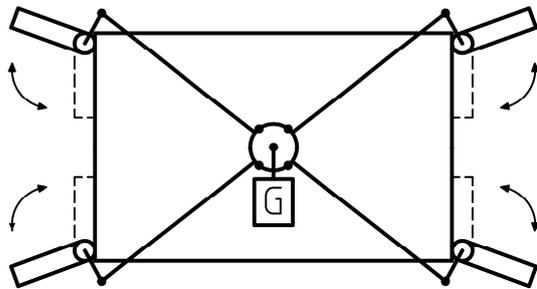


Abb. 8.10 Prinziplösung VIII Teilfunktionen:
1.4.1-2.1.1-2.2.4-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1

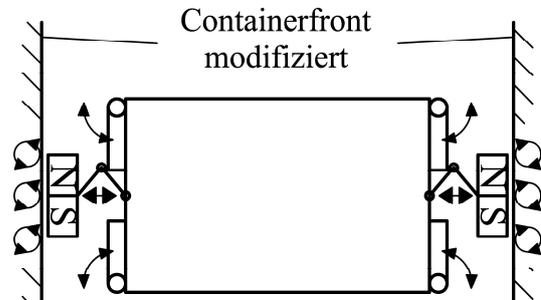


Abb. 8.11 Prinziplösung IX; Teilfunktionen:
1.1.4-2.1.1-2.2.2-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1

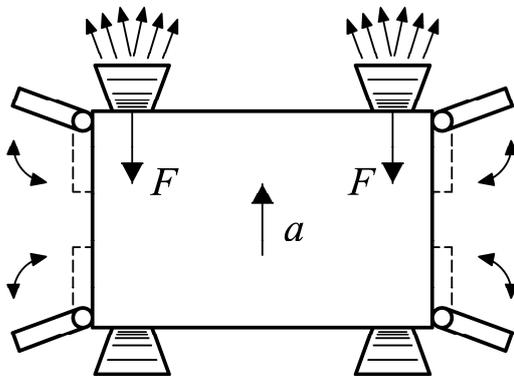


Abb. 8.12 Prinziplösung X; Teilfunktionen:
1.1.2-2.1.1-2.2.1-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1

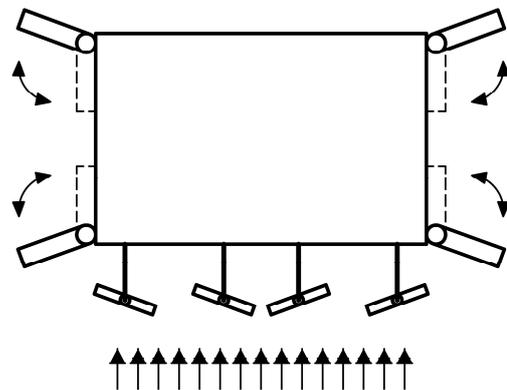


Abb. 8.13 Prinziplösung XI; Teilfunktionen:
1.1.5-2.1.1-2.2.1-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1

Bei der Prinziplösung IX wird der physikalische Effekt „Wirbelstrom“ eingesetzt. Zur Realisierung dieses physikalischen Wirkeffekts sind Elektromagnete an den Stirnseiten des LAM angebracht. Die Container müssen in dem Bereich gegenüber der Elektromagneten mit ebenen Metallprofilen ausgerüstet werden, die aus einem elektrisch leitfähigen Material bestehen. Da dieser Wirkeffekt eine Relativbewegung zwischen dem Container und dem LAM erfordert, sind zusätzliche Positionierungs- und Fixierungseinrichtungen notwendig.

In den Prinziplösungen X und XI (s. **Abb. 8.12** und **Abb. 8.13**) sind die Wirkprinzipien „Impuls“ und „Strömungswiderstand“ realisiert. Bei der Prinziplösungen X wird in Abhängigkeit der Beschleunigungsrichtung des LAM ein Fluid von Düsen ausgestoßen, wodurch eine Impulskraft erzeugt wird. Die Prinziplösung XI ermöglicht eine Energiewandlung durch einen Strömungswiderstand, der ähnlich wie bei einem Flugzeug durch variabel einstellbare Bremsklappen erzeugt wird. Beide Prinziplösungen benötigen zusätzliche Anschläge zur Positionierung und Fixierung.

8.4 Bewertung der Prinziplösungen

Zur Auswahl einer Prinziplösung, die am besten zur Realisierung der Positionierungsvorrichtung geeignet ist, wird in dieser Arbeit die Nutzwertanalyse eingesetzt. Die wesentlichen Entwicklungsziele für die Positionierungsvorrichtung sind eine kostengünstige Konstruktion und die Qualität der Funktionserfüllung. Da diese übergeordneten Entwicklungsziele jeweils die gleiche Bedeutung besitzen, erfolgt eine Gewichtung dieser Ziele mit einem Gewichtungsfaktor von jeweils 0,5. Das Zielkriterium „kostengünstige Konstruktion“ kann weiter unterteilt werden in die Teilziele bzw. Bewertungskriterien „Anzahl der Baugruppen zur Realisierung der Wirkprinzipien“, „Anzahl der Antriebe“ und „Änderungen an den Containern“.

Das Bewertungskriterium „Anzahl der Baugruppen zur Realisierung der Wirkprinzipien“ wird mit 0,25 gewichtet, da vorausgesetzt wird, dass die Herstellungskosten primär von der Anzahl der Baugruppen abhängig sind. Als Baugruppen werden in diesem Zusammenhang nur Wirkelemente betrachtet, die direkt zum Ausführen einer Funktion benötigt werden. Bauteile, die nicht unmittelbar an der Funktionserfüllung beteiligt sind, wie z.B. Linearführungen, Wellen usw., werden hierbei nicht berücksichtigt. Da die benötigten Antriebe hinzugekauft werden müssen und einen ähnlich großen Einfluss auf die Gesamtkosten besitzen wie die Anzahl der Bauteile, wird die Anzahl der Antriebe für die Durchführung der Funktionen separat betrachtet und mit 0,2 gewichtet. Das Bewertungskriterium „Änderungen an den Container“ berücksichtigt die Anforderung, dass die Container möglichst nicht modifiziert werden sollen, damit sich die Investitionskosten für das automatische Parksystem nicht erhöhen.

Ein wesentliches Teilziel bzw. Bewertungskriterium des übergeordneten Entwicklungsziels „Qualität der Funktionserfüllung“ ist die Positionierungsgeschwindigkeit. Diese Eigenschaftsgröße beeinflusst maßgeblich die Leistungsfähigkeit des Systems. Da die Leistungsfähigkeit für die Konkurrenzfähigkeit des Systems entscheidend ist, wird dieses Bewertungskriterium mit 0,25 gewichtet. Ein weiteres Teilziel ist die Funktionssicherheit der Prinziplösungen. In wie weit eine Prinziplösung die Funktionen zuverlässig ausführt und alle Anforderungen erfüllt muss anhand von Erfahrungen mit ähnlichen Konstruktionen und/oder durch Voruntersuchungen geklärt werden. Die Gewichtung dieses Bewertungskriteriums wird mit 0,15 festgelegt. Da die Bewertungskriterien „Bauraum“ und „Verschleiß“ den Konstruktionsprozess und den Betrieb beeinflussen, und daher einen untergeordneten Einfluss auf die Qualität der Funktionserfüllung besitzen, wird die Gewichtung dieser Bewertungskriterien mit 0,05 festgelegt.

Bevor eine Bewertung durchgeführt werden kann muss zunächst eine Werteskale definiert werden. Im Anschluss daran werden Erfüllungsgrade für jedes Teilziel bzw. Bewertungskriterium bestimmt und die Werte diesen Erfüllungsgraden zugeordnet. In der **Tab. 8.2** ist die Festlegung der Werte zu den entsprechenden Erfüllungsgraden für jedes Bewertungskriterium

dargestellt. Da die Eigenschaften der einzelnen Lösungsvarianten nur unzulänglich bekannt sind, besitzt die Werteskala fünf Punkte im Gegensatz zu der ansonsten üblichen Skala mit elf Punkten. Mit Hilfe der **Tab. 8.2** werden schließlich die Prinziplösungen aus Kap. 8.3 bewertet. Dabei werden die Prinziplösungen *X* und *XI* nicht bewertet, da bereits im Vorfeld der Aufwand zur Realisierung und die Funktionssicherheit als nicht durchführbar eingestuft worden sind. In der **Tab. 8.3** sind die Ergebnisse der Bewertung dargestellt.

| Ziele/Bewertungskrit. | | Werte und Erfüllungsgrade | | | | |
|-----------------------|---|--|---|--|---|--|
| | | $E_{\max} = 4$ | $E = 3$ | $E = 2$ | $E = 1$ | $E = 0$ |
| Kosten | Anzahl der notwendigen Baugruppen (ohne Antriebe) | ≤ 4 | 5-7 | 8-9 | 10-12 | ≥ 13 |
| | Anzahl der Antriebe | 1 | 2-4 | 5-7 | 8-10 | ≥ 11 |
| | Änderungen an den Containern | keine Änderung | geringfügige Änderung | mittlerer Änderungsaufwand | großer Änderungsaufwand | Container ist ungeeignet |
| Funktionserfüllung | Positionierungszeit | extrem schnell | schnell | mittelmäßig | langsam | sehr langsam |
| | Funktionssicherheit | Lösung ist erprobt und kann ohne Voruntersuchungen eingesetzt werden | Lösung ist bekannt, aber Voruntersuchungen sind notwendig | Lösungsprinzip ist neu, Voruntersuchungen sind notwendig | Funktionssicherheit ist unklar, hoher Entwicklungsaufwand notwendig | Sichere Funktionserfüllung ist nicht gewährleistet |
| | Bauraum | extrem gering | gering | mittlerer Bauraum | großer Bauraum | extrem großer Bauraum |
| | Verschleiß | kein Verschleiß | geringer Verschleiß | mittlerer Verschleiß | großer Verschleiß, kalkulierbar | großer Verschleiß nicht kalkulierbar |

Tab. 8.2 Festlegung von Erfüllungsgraden und Werten zu den Bewertungskriterien

Im Allgemeinen zeigt die Bewertungsmatrix in **Tab. 8.3**, dass die größten Gesamtwerte von Prinziplösungen erreicht werden, bei denen das Wirkprinzip „Reibung“ eingesetzt wird und die eine Integration der Funktionen „Positionierung horizontal“, „Positionierung vertikal“ und den dazugehörigen Fixierungen ermöglichen. Der größte Gesamtwert wird von der Prinziplösung *III* erreicht.

8.5 Bestimmung der Systemparameter

Wie bereits erläutert wurde, bestehen die Bauteile zur Dämpfung von mechanischen Schwingungen im Allgemeinen aus einem Element, das durch Reibung eine Energievernichtung erzeugt (i.Allg. auch als Dämpfer bezeichnet) und einer parallel angeordneten Feder zur Energiespeicherung. Der Dämpfungsgrad D des schwingungsfähigen Systems wird durch die Federkonstante c und die Dämpferkonstante d eingestellt. Dabei wird bei einem Dämpfungsgrad von $D = 1$ der aperiodische Grenzfall erreicht, bei dem die ausgelenkte Masse keine Schwingungen ausführt und direkt in die Ursprungsposition zurückkehrt.

In Abhängigkeit von der verwendeten Reibungsart können unterschiedliche Dämpfungskennlinien realisiert werden. Die **Abb. 8.14** zeigt beispielhaft einige Dämpferkraftverläufe in Abhängigkeit der Schwingungsgeschwindigkeit und der Reibungsart. Das Diagramm in **Abb. 8.14** verdeutlicht, dass bis auf den Dämpferkraftverlauf bei der viskosen Reibung alle übrigen Reibungsarten einen nichtlinearen Dämpferkraftverlauf aufweisen. Aufgrund der einfachen mathematischen Behandlung linearer Systeme ist der Ansatz der viskosen Reibung zur Berechnung der Dämpfungsparameter am besten geeignet. Durch Versuche und/oder Herstellerdaten muss geprüft werden, ob die ermittelten Dämpfungsparameter eine optimale Schwingungsdämpfung in dem realen System ermöglichen.

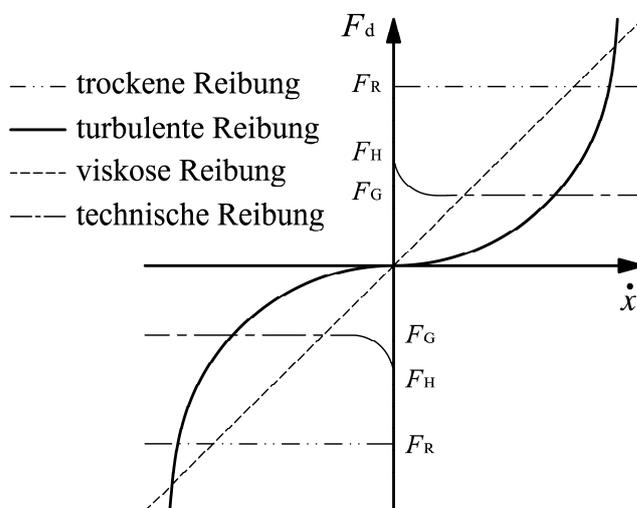


Abb. 8.14

Dämpferkraftverlauf in Abhängigkeit der Schwingungsgeschwindigkeit (in Anlehnung an /VDI09/)

Die Hauptanforderung an die Positionier Vorrichtung ist eine schnelle Reduzierung der Pendelbewegung. Gleichzeitig muss bei der Festlegung der Systemparameter berücksichtigt werden, dass durch die Beschleunigung und die Auslenkung des LAM keine Beschädigungen an den PKWs und den Containern verursacht werden. Die maximal zulässige Beschleunigung wird mit 3 m/s^2 ($0,3\text{-g}$) festgelegt. Bei dieser Beschleunigung ist sichergestellt, dass die Haftreibungskraft zwischen einem PKW und einer Rollpalette größer ist als die Kraft, die infolge der Beschleunigung auf einen PKW wirkt. Des Weiteren kann bei der festgelegten Beschleunigung eine Beschädigung der Container ausgeschlossen werden.

Die maximale zulässige Auslenkung des LAM bei dem Einsatz der Positionierungsvorrichtung wird durch den Winkel und die Länge der Anschläge für die Positionierung und Zentrierung beschränkt. Bei der Schwingungsdämpfung des LAM berühren die Anschläge die Containerinnenseite und werden in die Ausgangsposition geschwenkt. Die Winkeländerung der Träger bewirkt, dass sich die effektive Länge der Anschläge reduziert, wodurch die Dämpferkraft verringert wird. Im Extremfall ist die effektive Länge der Anschläge geringer als der Abstand zwischen dem LAM und den Containern, so dass keine Dämpferkraft mehr erzeugt werden kann. Aus dem genannten Grund wird die maximale Auslenkung mit 150 mm, bei einer Länge der Anschläge von 500 mm, festgelegt.

Die Bestimmung der Systemparameter erfolgt mit Hilfe der Simulation, einer Positionierung mit *Strategie 5* und den Parametern nach **Abb. 8.1**. Zur Nachbildung des Dämpfungsverhaltens in der Simulation wird die Bewegungsgleichung 5.8 um die Kräfteinflüsse der Dämpfer und Federn erweitert. Als Anfangswertwert wird die maximale Schwingungsgeschwindigkeit der Pendelbewegung nach der Positionierung verwendet. Zur Bestimmung der Systemparameter werden schließlich für Dämpfungsgrade von 0,5 bis 1 und ein beladenes LAM ($m = 8.000 \text{ kg}$) jeweils die Gesamtwerte der Federsteifigkeit und der Dämpferkonstante variiert. Dabei wird für jeden Dämpfungsgrad die Federsteifigkeit in festgelegten Schritten erhöht. Die Dämpferkonstante d wird in Abhängigkeit der Federsteifigkeit mit Hilfe der Gl. 8.1 bestimmt.

$$d = 2D\sqrt{mc} \quad (8.1)$$

Anhand der Simulationsergebnisse und unter Berücksichtigung der Randbedingungen werden als Systemparameter für die Positionierungsvorrichtung eine Federsteifigkeit von insgesamt $c = 84.500 \text{ N/m}$ und eine Dämpferkonstante von insgesamt $d = 26.000 \text{ Ns/m}$ festgelegt, wodurch ein Dämpfungsgrad von $D = 0,5$ erreicht wird. Mit diesen Systemparametern kann das LAM in ca. 4,5 s positioniert werden. Bei der Konstruktion und Auswahl von Zukaufteilen muss berücksichtigt werden, dass die Dämpfer- und Federkraft von zwei Anschlägen mit jeweils zwei Dämpfersystemen aufgebracht wird. Die Systemparameter der jeweiligen Dämpfersysteme müssen dementsprechend reduziert werden.

In der **Abb. 8.15** ist die simulierte Auslenkung des LAM dargestellt, die bei dem Einsatz der Positionierungsvorrichtung und den festgelegten Systemparametern nach der Positionierung entsteht. Neben der Auslenkung des LAM bei einer maximalen Beladung zeigt das Diagramm auch, wie sich die Auslenkung bei einem unbeladenen LAM reduziert. Im Vergleich zu den Simulationen mit einer Masse von 8.000 kg verringern sich die Auslenkung und die Positionierungszeit. Gleichzeitig erhöht sich die Beschleunigung. Da die Beanspruchung der Container nicht durch die höhere Beschleunigung beeinflusst wird, ist eine Änderung der Systemparameter bei einem unbeladenen LAM nicht notwendig. Die **Abb. 8.16** zeigt, wie sich der Einsatz der Positionierungsvorrichtung auf die Pendelbewegung aus **Abb. 8.1** auswirkt.

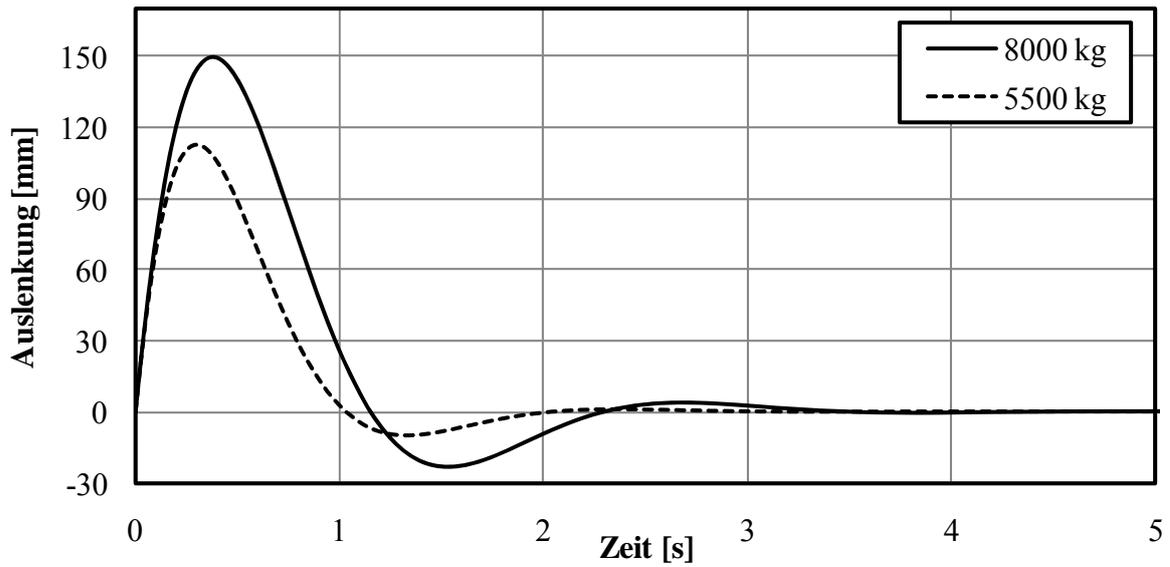


Abb. 8.15 Simulierte Auslenkung des LAM im beladenen und unbeladenen Zustand nach der Positionierung und dem Einsatz der Positionierungsvorrichtung. Systemparameter: $c = 84 \text{ kN/m}$, $d = 26 \text{ kNs/m}$

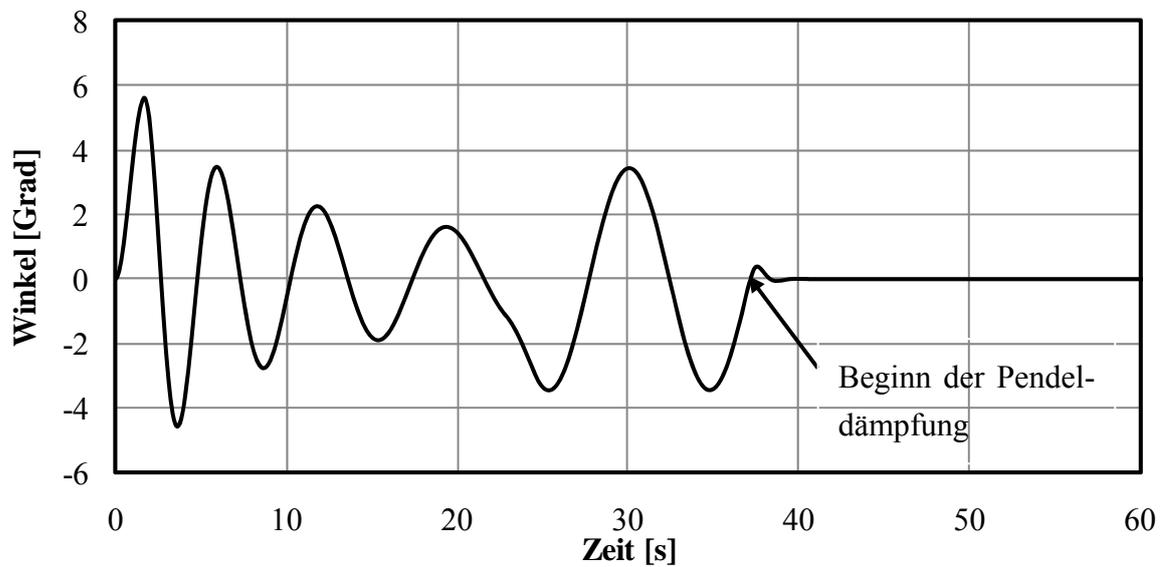


Abb. 8.16 Anwendung der Positionierungsvorrichtung bei der Pendelbewegung aus **Abb. 8.1**

8.6 Konstruktion eines LAM mit Positionierungsvorrichtung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden am Fachgebiet Maschinenelemente, in Kooperation mit der AVIPO GmbH, die Positionierungsvorrichtung und ein LAM konstruiert /JÜN08/. Das LAM besteht im Wesentlichen aus einer Stahl-Rahmenkonstruktion (1, in **Abb. 8.17**) mit zwei Ebenen für die Handhabung von belegten und nicht belegten Paletten. Für die Handhabung von PKWs und Gütern auf Rollpaletten sind Transfereinheiten (2, in **Abb. 8.17**) auf beiden Ebenen vorgesehen, die mit Reibradantrieben eine Förderung der Rollpaletten ermöglichen. Für jede Palettenebene werden vier Anschläge (3, in **Abb. 8.17**) zur horizontalen und vertikalen Positionierung und Fixierung eingesetzt.

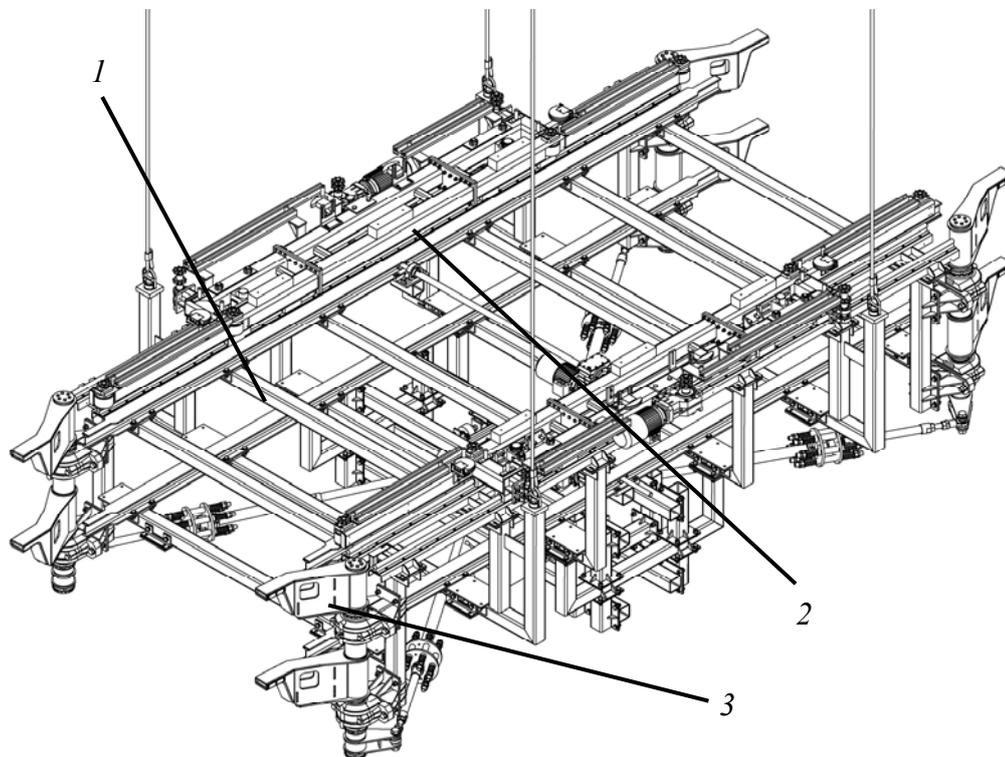


Abb. 8.17 LAM mit Positionierungsvorrichtungen für den Transport von PKWs in einem automatischen Parksystem (in der Darstellung ist nur die Transfereinheit der oberen Palettenebenen dargestellt)

Die Anschläge zur Positionierung sind jeweils paarweise mit einer Welle drehbar an dem LAM angeordnet. Während dem Verfahren des LAM sind die Anschläge eingeklappt, so dass eine Kollision mit den Containern nicht möglich ist. Nach der Positionierung des LAM werden die Schwenkarme um ca. 90° ausgeschwenkt. Im ausgeschwenkten Zustand (s. **Abb. 8.18**) liegen die vier Schwenkarme seitlich an der Containerinnenwand an, wodurch eine exakte Ausrichtung des LAM in horizontaler Richtung gewährleistet ist. Nach der Positionierung in horizontaler Richtung wird das gesamte LAM herabgelassen, bis die Schwenkarme auf dem Containerboden aufliegen, wodurch eine exakte Positionierung in vertikaler Richtung sichergestellt ist. Nach dem Positionierungsvorgang und der Fixierung wird die gesamte Masse des LAM von den Schwenkarmen aufgenommen.

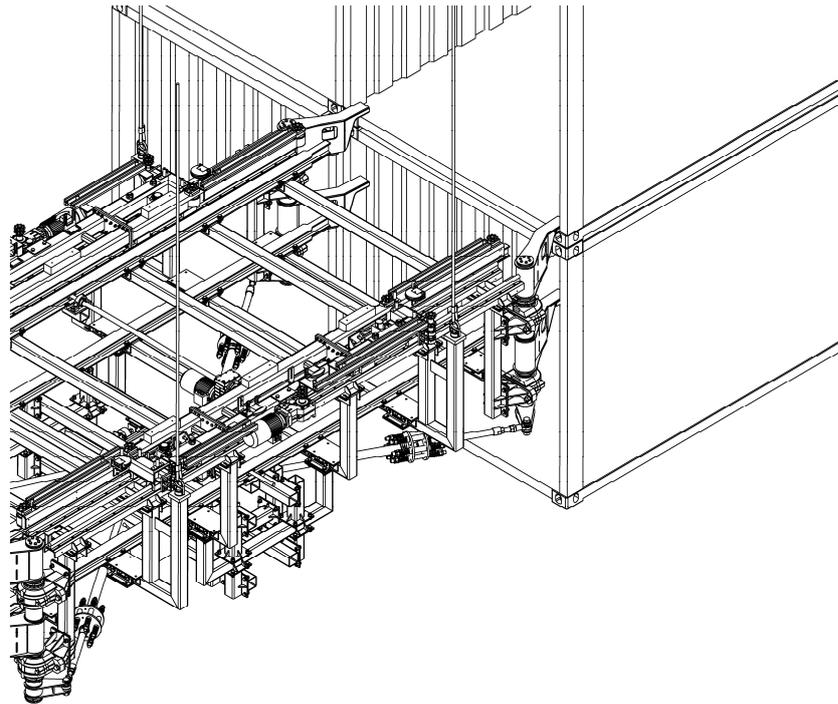


Abb. 8.18 Darstellung des LAM nach der Positionierung zu einem Container

Zum Antrieb der Schwenkarme wird ein Drehteller (1 in **Abb. 8.19**) eingesetzt, der zentral unterhalb des LAM angeordnet ist. Das notwendige Drehmoment des Drehtellers erzeugt ein Elektromotor (2 in **Abb. 8.19**), der durch ein Zahnrad das Drehmoment auf ein Zahnsegment und den Drehteller überträgt. Eine Weiterleitung der Drehbewegung und des Drehmoments auf die Schwenkarme erfolgt durch Schubstangen (3 in **Abb. 8.19**). Die Dämpfungssysteme (4 in **Abb. 8.19**) zur Reduzierung der Pendelbewegung nach der Positionierung sind in die Schubstangen integriert und bestehen jeweils aus einem Industriestoßdämpfer mit parallel angeordneten Federn. Durch die Anordnungen der Schubstangenanschlüsse wird das gesamte System durch Zugkräfte beansprucht.

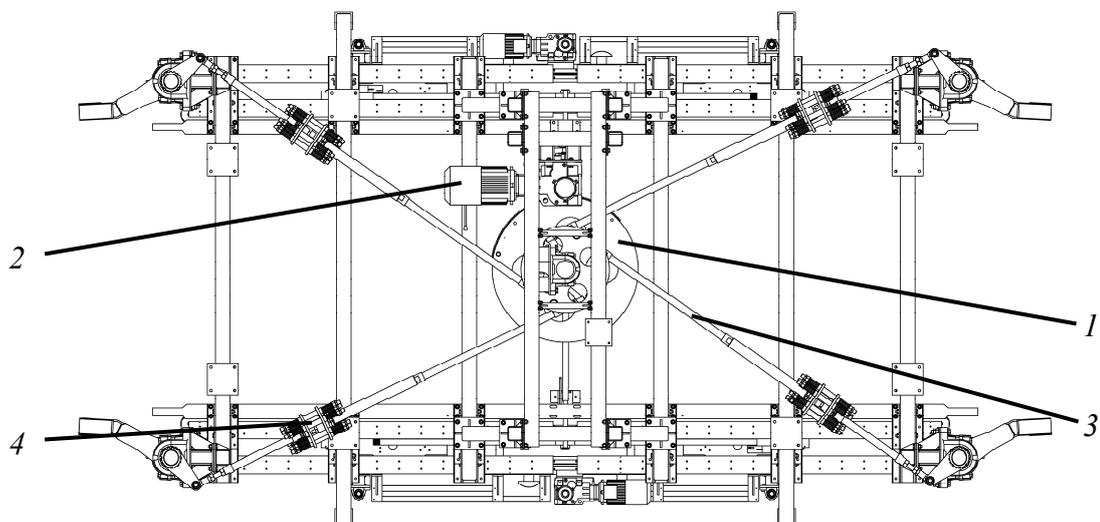


Abb. 8.19 Unteransicht des LAM

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Kostenreduktion von vollautomatischen Parksystemen, indem der Einsatz von automatisierten Kranen als Primärfördermittel und der Einsatz von Steuerungsstrategien zur Lastpendeldämpfung untersucht wird. Darüber hinaus wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Positionierungsvorrichtung entwickelt, die ein schnelles Abklingen von Restschwingungen ermöglicht und somit die Leistungsfähigkeit von automatisierten Krananlagen in Lagersystemen steigert, wodurch erstmalig eine Konkurrenzfähigkeit erreicht wird.

Der wesentliche Vorteil von vollautomatischen Krananlagen im Vergleich zu RBG ist der einfachere mechanische Aufbau, wodurch Investitionskosten eingespart werden. Ein Nachteil von Krananlagen ist das Lastpendeln. Zur Vermeidung und Reduktion des Lastpendelns sind zahlreiche mechanisch oder elektronisch wirkende Lastpendeldämpfungen bekannt. Die mechanisch wirkenden Lastpendeldämpfungen sind für Krananlagen in Lagersysteme nicht geeignet, da sie i.Allg. aufgrund des konstruktiven Aufwands den Kostenvorteil von Kransystemen reduzieren. Bei den elektronischen Lastpendeldämpfungen erfolgt eine Lastpendeldämpfung durch eine Regelung oder Steuerung. Die bekannten Regelungssysteme benötigen eine aufwendige Messtechnik zur Erfassung des Tragseilwinkels. Aufgrund der Messtechnik sind diese Systeme kostenintensiv und stör anfällig. Darüber hinaus können Regelungssysteme nur auf eine vorhandene Pendelauslenkung reagieren und limitieren somit die Leistungsfähigkeit von Krananlagen. Die beschriebenen Nachteile von Regelungssystemen werden von Lastpendeldämpfungen vermieden, bei denen ein pendelfreies Erreichen der Zielposition mit Hilfe von Steuerungsstrategien ohne eine Rückführung des Pendelwinkels erfolgt.

Die bekannten Steuerungsstrategien wurden vor allem für den Einsatz von Kranen in Häfen entwickelt. Der Einsatz von Krananlagen in vollautomatischen Parksystemen unterscheidet sich von diesem Anwendungsfall vor allem durch die Beschleunigungen, Verfahrgeschwindigkeiten und Verfährwege. Des Weiteren sind die vorhandenen Steuerungsstrategien fast ausschließlich für eine konstante Tragseillänge während dem Verfahren gültig. Eine Anpassung der Steuerungsstrategien an eine veränderliche Tragseillänge kann durch die Berechnung der Schaltzeitpunkte mit einem Mittelwert der Tragseillänge erfolgen oder durch die Anwendung der Methode des Input-Shaping.

Zur Untersuchung der vorhandenen Steuerungsstrategien hinsichtlich ihrer Eignung wurden in einem ersten Schritt mathematische Modelle entwickelt, die eine Berechnung des Lastpendelns in Abhängigkeit der Beschleunigung der Laufkatze ermöglichen. Da das Lastpendeln auch durch die Tragseilanordnung beeinflusst werden kann, wurden mathematische Modelle für eine parallele und trapezförmige Tragseilanordnung entwickelt. Insbesondere bei der tra-

pezförmigen Tragseilanordnung waren bisher keine mathematischen Modelle für eine veränderliche Tragseillänge während dem Verfahren vorhanden. Die Modelle wurden schließlich in das Simulationsprogramm SIMULINK der Firma MATHOWRKS implementiert.

In den Simulationsuntersuchungen wurden Bewegungsvorgänge mit einer konstanter und einer veränderlicher Tragseillänge durchgeführt, wobei die Parameter der Bewegungsvorgänge variiert worden sind. Da alle Steuerungsstrategien theoretisch eine lastpendelfreie Positionierung ermöglichen, ist die Auslenkung nach der Positionierung unter der Berücksichtigung von kinematischen und geometrischen Toleranzen von besonderem Interesse. Zur Untersuchung des Einflusses von kinematischen Toleranzen auf die Pendelauslenkungen wurde die Position der Beschleunigungsintervalle bei den Versuchen mit einer konstanten Tragseillänge während dem Verfahren in festgelegten Schritt vergrößert, bis die maximalen Auslenkungen nach der Positionierung feststanden. Bei den Versuchen mit einer veränderlichen Tragseillänge entstehen die kinematischen Toleranzen bereits durch Änderung der Tragseillänge während dem Verfahren.

Die Simulationsergebnisse für eine konstante Tragseillänge zeigen, dass die kürzesten Positionierungszeiten mit Steuerungsstrategien erreicht werden, die einen lokalen Lastpendelausgleich ermöglichen. Gleichzeitig verursacht die Anwendung dieser Steuerungsstrategien die größten Auslenkungen nach der Positionierung aufgrund der geringen Robustheit. Durch die betrachtete trapezförmige Tragseilanordnung mit einem maximalen Tragseilwinkel von 4° können keine signifikanten Reduzierungen der maximalen Auslenkungen während und nach dem Verfahren erreicht werden. Für eine deutliche Reduzierung der maximalen Auslenkungen nach der Positionierung sind größere Tragseilwinkel erforderlich, die nur mit einem großen konstruktiven Aufwand realisiert werden können.

Bei den Simulationsuntersuchungen mit einer veränderlichen Tragseillänge und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Tragseillänge reduziert sich die Spielzeit beim Heben der Last. Dem gegenüber vergrößert sich die Spielzeit bei dem Senken der Last. Die maximalen Auslenkungen während und nach dem Verfahren steigen unabhängig von der verwendeten Steuerungsstrategie mit der Distanz, die das LAM gehoben oder abgesenkt wird. Dabei sind die Pendelauslenkungen beim Senken der Last größer als beim Heben. Wie zu erwarten ist werden durch die Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich die größten Auslenkungen während und nach der Positionierung erzielt. Bei den maximalen Auslenkungen während dem Verfahren ist kein Einfluss der Tragseilanordnung erkennbar. Die maximalen Auslenkungen nach dem Verfahren und der Anwendung von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich sind bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung geringer.

Die Anpassung der Steuerungsstrategien an eine veränderliche Tragseillänge mit der Methode des Input-Shaping ermöglicht eine wirkungsvolle Reduzierung der Auslenkungen beim He-

ben und Senken. Ein Nachteil hingegen ist die größere Positionierungszeit, die von den Input-Shapern verursacht wird. Da die Reduzierung der Spielzeit eine wesentliche Anforderung ist, wird auf der Grundlage der Simulationsergebnisse der Einsatz von Steuerungsstrategien mit einem lokalen Lastpendelausgleich und einer Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Tragseillänge empfohlen. Sollte die geringe Robustheit dieser Strategien Probleme hervorrufen ist eine einfache Modifikation durch das Input-Shaping möglich.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse und zur Untersuchung des Einflusses von geometrischen Toleranzen auf das Lastpendeln wurde ein Kranmodell im Maßstab 1:10 entwickelt und aufgebaut. Die durchgeführten Experimente mit dem Modellkran zeigen, dass die Simulationsmodelle qualitativ korrekt sind. Darüber hinaus zeigen die Modellversuche, dass bei Kranen mit einer parallelen Tragseilanordnung und Toleranzen bei den Tragseilaufhängungen bis zu siebenfach größere Auslenkungen entstehen können. Bei der trapezförmigen Tragseilanordnung werden die größten Auslenkungen durch die Verlagerung des Massenschwerpunkts hervorgerufen. Die Auswertung der Modellergebnisse ermöglicht schließlich eine Festlegung der Verfahrgassenbreite.

Zum Abschluss dieser Arbeit wurde auf der Grundlage der Simulationsergebnisse und Modellexperimente eine Positionierungsvorrichtung systematisch entwickelt. Die Positionierungsvorrichtung ermöglicht eine schnelle Eliminierung von Restschwingungen und eine exakte Ausrichtung des LAM zu einem Lagerplatz.

Die durchgeführte Arbeit zeigt, dass der Einsatz von automatisierten Krananlagen in vollautomatischen Parksystemen entscheidend dazu beitragen kann, die Investitionskosten für den Bau von vollautomatischen Parksystemen zu reduzieren. Darüber hinaus haben die Untersuchungen bewiesen, dass automatisierte Krananlagen bei der Anwendung von Steuerungsstrategien und mit Hilfe der neuen Positionierungsvorrichtung eine konkurrenzfähige Leistung besitzen. In weiterführenden Untersuchungen und Prototypenversuchen muss ermittelt werden, welche Antriebe und Steuerungssysteme am besten für den Einsatz von Steuerungsstrategien geeignet sind.

Weitere Möglichkeiten zur Kostenreduzierung entstehen durch den Einsatz von Steuerungsstrategien, die hinsichtlich der Energiereduzierung optimiert sind, oder durch den Einsatz von mehreren Bediengeräten in einer Verfahrgasse. Die Untersuchung von Steuerungsstrategien zur energieoptimalen Positionierung kann mit Hilfe der beschriebenen Simulationsmodelle durchgeführt werden. Der Einsatz von mehreren Kranen in einer Verfahrgasse erfordert eine genaue Prüfung der Bewegungsvorgänge hinsichtlich Kollisionen. In wie weit eine Kostenreduktion durch energieoptimale Steuerungsstrategien und eine Steigerung der Leistung durch den Einsatz mehrerer Bediengeräte in einer Verfahrgasse möglich ist, muss in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- /AUE85/ Auernig, J. W.: Steuerstrategien für Laufkatzen zur Vermeidung des Lastpendelns im Zielort. Dissertation, Wien, 1985
- /AUE86/ Auernig, J. W.: Einfache Steuerungsstrategien für Laufkatzen zur Vermeidung des Lastpendelns im Zielpunkt. In: f+h – fördern und heben, Band 36, Ausgabe Nr. 6, Mainz, 1986
- /AUE87/ Auernig, J. W.; Troger, H.: Time optimal control of overhead cranes with Hoisting of the load. In: Automatica, Band 23, Nr. 4, Illinois (USA), 1987
- /BUC99/ Buch, A.: Optimale Bewegungssteuerung von schwingungsfähigen mechatronischen Systemen mit zwei Freiheitsgraden am Beispiel eines Krans mit pendelnder Last und elastischer Mechanik. Dissertation, Magdeburg, 1999
- /CHR00/ Chrest, A.; Smith, M.; Bhuyan, S.; Iqbal, M.; Monahan, D.: Parking Structures: Planning, Design, Construction, Maintenance and Repair. Kluwer Academic Publishers, 3. Aufl., Norwell (USA), 2004
- /DER07/ Dresig, H.; Holzweißig, F.: Maschinendynamik. Springer Verlag, 8. Auflage, Berlin, 2007
- /FGS95/ N.N.: Hinweise zum Einsatz mechanischer Parksysteine. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 1995
- /FIT01/ Fittinghoff, M.: Beitrag zur Leistungsbetrachtung von Parksysteinen. Dissertation, Dortmund, 2001
- /FOR06/ Fortgang, J.; Patrangenaru, V.; Singhose, W.: Scheduling of input shaping and transient vibration absorbers for high rise elevators. In: American Control Conference, Minneapolis (USA), 2006
- /FRA73/ Franke, R.: Über die Unterdrückung des Lastpendelns bei Laufkatzen, insbesondere von Containerkränen. Dissertation, München, 1973
- /GRO08/ Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W.A.: Technische Mechanik 3 – Kinetik. Springer Verlag, 10. Auflage, Berlin, 2008
- /GÜR08/ Gürleyük, S. S.; Bahadır, Ö.; Türkkan, Y.; Üsenti, H.: Improved three-step input shaping control of crane system. In: World Scientific and Engineering Academy and society (WSEAS) – Transaction on Systems, Band 7, Nr. 6; 2008

- /HEI91/ Heinl, H.-U., Franzen, H., Hochreiter, J.-M.: Lastpendelgedämpfte Krane mit Fahrtriebsregelung und Pendelwinkelrückführung. In: Deutsche Hebe- und Fördertechnik-dhf, Ludwigsburg, 1991
- /HEP02/ Heptner, R.: Sensorik für Lastpendeldämpfung von Brückenkranen - Vergleich der Systeme. In: Wt - Werkstattstechnik online, Berlin, 2002
- /HER99/ Hering, E.; Martin, R.; Stoher, M.: Physik für Ingenieure. Springer Verlag, 7. Auflage, Berlin, 1999
- /HOF02/ Hoffmann, J.; Brunner, U.: Matlab und Tools. Für die Simulation dynamischer Systeme. Addison-Wesley, München, 2002
- /HUB09/ Hubisky, P.; Pospiech, T.: Hier schwappt nichts über – Resonanzfreies Positionieren von schwingungsfähigen Systemen. In: IEE – Automatisierung und datentechnik, Hüthig Fachverlag, Heidelberg, 2002
- /JÜN99/ Jünemann, R.; Schmidt, T.: Materialflußsysteme – Systemtechnische Grundlagen. Springer Verlag, 2. Auflage, Berlin, 1999
- /JÜN08/ Jünemann, R.: Entwicklung von effizienten Beschickungs- und Entnahmetechniken. Schlussbericht zum Förderprojekt 005-0506-0030. Gefördert im Rahmen des Ziel2-Programms vom Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Dortmund, 2008
- /KIM04/ Kim, Y.-S.; Hong, K.-S.; Sul, S.-K.: Anti-Sway Control of Container Cranes: Inclinometer, Observer, and State Feedback. In: International Journal of Control, Automation and Systems, Band 2, Heft 4, Korea, 2004
- /KIR94/ Kirchmann, J.: Gestaltung und Betrieb leistungsstarker automatischer Parksysteme. Dissertation, Dortmund, 1994
- /KLE96/ Kleinschnittger, A.: Entwicklung eines aktiven Lastführungssystems zur Pendeldämpfung und Positionierung für Brückenkrane. Dissertation, Dortmund, 1996
- /KOL98/ Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau - Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. Springer Verlag, 4. Auflage, Berlin, 1998
- /KÜN05/ Künne, B.: Konstruktionssystematik und CAD. Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung, Dortmund, 2005
- /KÜN07/ Künne, B.; Eller, J.: Analysis of open-loop control strategies for automated overhead material handling systems. In: Research Report 2007, NRW Graduate School of production Engineering and Logistics (Hrsg.), Dortmund, 2007

- /KUR04/ Kurfess, T. R.: Robotics and automation handbook. CRC Press, Boca Raton (USA), 2005
- /LEE05/ Lee, H.-H.: Motion planning for three-dimensional overhead cranes with high-speeds load hoisting. In: International Journal of Control, Vol. 78, Nr. 12, 2005
- /LEH02/ Lehnert, M.: Lastpendeldämpfung heute – Entwicklungen, Erfahrungen, Trends. In: Tagungsband zur 10. Internationalen Kranfachtagung. Magdeburg, 2002
- /LEH99/ Lehnert, M.: Modulares System Parkrapid - Der Automatikkrane im Parkhaus. In: Hebezeuge und Fördermittel, Berlin, 1999
- /MAR04/ Margono, B. S.: Optimierung von Bewegungsabläufen mit schwingungsfreien Endpositionen zur Verkürzung der Arbeitszyklen von Container-Schnellumschlagsanlagen. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004
- /MEY71/ Meyer, S.; Zimmermann, W.: Selbsttätige Konstruktion der Lastpendelungen bei Katzfahrantrieben. In: Siemens-Zeitschrift, Band 45, Nr. 10, München, 1971
- /NN86/ N.N.: Automatischer Greiferkrane. In: Industrie-Anzeiger, Leinfelden-Echterdingen, 1986
- /NN02/ N.N.: Automatisierung mit Transfaster – Kostengünstige Alternative für Schmalganglager. In: Hebezeuge und Fördermittel, Berlin, 2002
- /PAL96/ Palis, F.; Buch, A.; Ladra, U.: Optimale Kransteuerung. Preprint Nr. 8, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. 1996
- /PAL06/ N.N.: Round Palis. Firmenschrift: Parking technologies GmbH, Gersthofen, 2006
- /PAP07/ Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium. Vieweg + Teubner Verlag, 11. Auflage, Wiesbaden, 2007
- /PAT06/ Schutzrecht US832979: Garage. Anmeldetag: 30.07.1906; Anmelder und Erfinder: Kellogg, C.
- /PAT82a/ Offenlegungsschrift DE3233444: Verfahren zur Seitenverschiebung einer an einer Laufkatze hängenden Last. Anmeldetag: 9.9.1982. Anmelder: ASEA AB. Erfinder: Ling, B.; Sternad, M.

- /PAT82b/ Schutzrecht DE3228302: Pendeldämpfung für Krane. Anmeldetag 29.7.82. Anmelder: Fried. Krupp GmbH, Erfinder: Sedlmayer, F.
- /PAT86/ Offenlegungsschrift DE3627580: Verfahren zum Steuern eines Krans. Anmeldetag: 14.8.86. Anmelder: Hitachi Ltd. Erfinder: Yasunobu, S.; Miyamoto, S.
- /PAT87/ Schutzrecht DE3714570: Steuerung zur Lastpendeldämpfung für einen Hängekran. Anmeldetag: 30.4.1987. Anmelder: Mitsubishi Denki K.K. Erfinder: Yasuhisa, A.; Hyogo, K.
- /PAT88/ Offenlegungsschrift DE3842918: Verfahren zur Steuerung des Bewegungsablaufs einer pendelfähig gehaltenen Last. Anmeldetag: 21.12.1988. Anmelder: Asea Brown Boveri AG. Erfinder: Schönberger, U.
- /PAT89/ Schutzrecht US 4997095: Methods of and system for swing movement of suspended objects. Anmeldetag: 20.4.1989. Erfinder: Jones, F.; Petterson, B.; Strip, D.
- /PAT94/ Schutzrecht EP0626337: Procedure for controlling a crane. Anmeldetag: 26.05.1994; Anmelder: KCI-Kone Cranes International Oy; Erfinder: Kiiski, T.
- /PAT99/ Schutzrecht DE19920923: Lagersystem, insbesondere für Hochregallager. Anmeldetag: 6.5.1999. Anmelder: Krusche Lagertechnik AG. Erfinder: Rüdiger, W. et al.
- /PAR06/ N.N.: Automated vehicle storage systems. Firmenschrift: Parc Plus Inc., Oakland, 2006
- /PEC06/ Pech, A.; Warmuth, G.; Jens, K.; Zeininger, J.: Parkhäuser – Garagen. Grundlagen, Planung, Betrieb. Springer Verlag, 1. Aufl., Wien, 2006
- /PON67/ Pontrjagin, L. S.: Mathematische Theorie optimaler Prozesse. Oldenbourg Verlag, München, 1967
- /PRI09/ N.N.: Paternosteranlage Typ 530/210. Firmenschrift: Walter F. Pristinger, Bad Wiessee, 2009
- /ROB02/ Robinett, R. D.; Dohrmann, C.; Eisler, G.R.; Feddema, J.; Parker, G.G.; Wilson, G.D.; Stokes, D.: Flexible robot dynamics and controls. Kluwer Academy Publishers, New York (USA), 2002
- /SAK82/ Sakawa, Y.; Shindo, Y.: Optimal Control of Container Cranes. In: Automatica, Vol. 18, Nr. 3, Illinois (USA), 1982

- /SAL00a/ Salomon, J.: Beitrag zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit konventioneller und automatischer Parksysteme. Dissertation, Dortmund, 2000
- /SAL00b/ Salomon, J.; Fittinghoff, M.; Jünemann, R.; Kuhn, M.: Automatic parking systems: analysis, planning and implementation. In: Mecalux, Nr. 27, 2000
- /SAL02/ Salomon, J.; Fittinghoff, M.: Automatische Parksysteme – Wirtschaftlich und komfortabel planen. In: Hebezeuge und Fördermittel, Berlin, 2002
- /SAW01/ Sawodny, O.: Kranautomatisierung und Großraumrobotik. VDI-Verlag, Band Nr. 888, Düsseldorf, 2001
- /SCH08/ Schweizer, W.: Matlab kompakt. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 3. Auflage, 2008
- /SCH80/ Schmidt, U.: Ein adaptiver Beobachter für einen Brückenkran. In: Regelungstechnik, Oldenbourg Verlag, München, 1980
- /SEE07/ Seemann, A.: Flurfreie Regalbedienung bietet neue Einsatzmöglichkeit im HRL. In: Logistik für Unternehmen, Berlin, 2007
- /SIE99/ N.N.: Antriebs- und Steuerungskomponenten für Hebezeuge – Katalog HE1. Firmenschrift der Siemens AG, Erlangen, 1999
- /SIN02/ Singhose, W.; Singh, T.: Tutorial on input shaping/time delay control of maneuvering flexible structures. In: Proceedings of the American control conference, 2002
- /SIN92/ Singhose, W.; Huey, J.: Effect of vertical acceleration on the frequency of pendulum: impact on input shaping. In: Proceedings of IEEE Conference on control applications, 2003
- /SIN97/ Singhose, W. E.: Command Generation for flexible Systems. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology (USA), 1997
- /STÖ07/ Stöcker, H.: Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren. Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, 4. Auflage, Frankfurt am Main, 2007
- /TEN07/ Ten Hompel, M.; Schmidt, T.; Nagel, L.: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik. Springer Verlag, Berlin, 2007
- /THI96/ Thiemann, P.: Beitrag zur Gestaltung von Steuerungssystemen für die Automatisierung von Brückenkränen. Dissertation, Dortmund, 1996

- /TOK08/ Tokhi, M. O.; Azad, A. K. M.: Flexible Robot Manipulators: Modeling, Simulation and Control. Institution of Engineering and Technology, London (GB), 2008
- /VDI98/ Richtlinie VDI 3653: Automatisierte Kransysteme. Beuth Verlag, Berlin, 1998
- /VDI00/ Richtlinie VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin, 2000
- /VDI01/ Richtlinie VDI 4466: Automatische Parksysteine – Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin, 2001
- /VDI04/ Richtlinie VDI 4468: Elektronische Pendeldämpfung für Krane. Beuth Verlag, Berlin, 2004
- /VDI09/ Richtlinie VDI 3833: Schwingungsdämpfer und Schwingungstilger – Schwingungsdämpfer; Begriffe, Kenngrößen, Realisierung, Anwendung. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- /WAG99/ Wagner, G.; Rother, D.: Ein neuartiges Verfahren zur Unterdrückung des Lastpendelns im Zielort. In: Begleitband zur 7. Kranfachtagung, Magdeburg, 1999
- /WÖH06a/ N.N.: Parksafes 580. Firmenschrift: Otto Wöhr GmbH, Frielzheim, 2006
- /WÖH06b/ N.N.: Car Display Tower. Firmenschrift: Otto Wöhr GmbH, Frielzheim, 2006
- /ZIE94/ Ziems, D.; Neumann, G.: Einsatzfelder von automatisierten Kranen in Brückenbauweise. Tagungsband zur Kranfachtagung 94 „Neue Trends bei automatisierten Kranen“, Dortmund, 1994
- /ZIR06/ Zirn, O.; Weikert, S.: Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme. Eine praxisnahe Einführung. Springer Verlag, Berlin, 2006

Abkürzungen und Formelzeichen

Verwendete Abkürzung

| Abkürzung | Bedeutung |
|-------------|--|
| A/D-Wandler | Analog/Digital-Wandler |
| CAD | Computer aided design |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| EI-Shaper | Extra insensitive Shaper |
| elektr. | Elektrisch |
| FIR-Filter | Finite impulse response filter |
| fluid. | Fluidisch |
| FTS | Fahrerloses Transportsystem |
| IR | Infrarot |
| LAM | Lastaufnahmemittel |
| mech. | Mechanisch |
| MEMS | Micro-Electro-Mechanical-Systems |
| Mod. | Modell |
| PD-Regler | Proportional-differential wirkender Regler |
| PKW | Personenkraftwagen |
| P-Regler | Proportional wirkender Regler |
| RBG | Regalbediengerät |
| Regr. | Regressionsgerade |
| Sim. | Simulation |
| VDI | Verein deutscher Ingenieure |
| ZVD-Shaper | Zero Vibration and derivative Shaper |
| ZV-Shaper | Zero Vibration Shaper |

Verwendete Formelzeichen

| Zeichen | Einheit | Bedeutung |
|---------|----------------|---|
| a | m/s^2 | Beschleunigung |
| A | | Impuls-Amplitude |
| A | | Hilfsfunktion zur Bestimmung der Bewegungsgleichung für die trapezförmige Tragseilanordnung |
| a_K | m/s^2 | Beschleunigung Laufkatze |
| a_L | m/s^2 | Beschleunigung des LAM |
| b | m | Abstand der Tragseile am LAM |
| B | | Hilfsfunktion zur Bestimmung der Bewegungsgleichung für die trapezförmige Tragseilanordnung |

| Zeichen | Einheit | Bedeutung |
|---------------------|------------------|---|
| B | T | Magnetische Flussdichte |
| C | | Hilfsfunktion zur Bestimmung der Bewegungsgleichung für die trapezförmige Tragseilanordnung |
| c | N/m | Federsteifigkeit |
| $C(\omega, D)$ | | Hilfsfunktion zur Bestimmung des Restschwingungsmaß |
| d | Ns/m | Dämpferkonstante |
| d | m | Abstand der Tragseile an der Laufkatze |
| D | | Hilfsfunktion zur Bestimmung der Bewegungsgleichung für die trapezförmige Tragseilanordnung |
| D | | <i>Lehrsches</i> Dämpfungsmaß |
| e | m | Abstand des Massenschwerpunkts des LAM von der Tragseilaufhängung |
| E | | Hilfsfunktion zur Bestimmung der Bewegungsgleichung für die trapezförmige Tragseilanordnung |
| E | | Erfüllungsgrad |
| E_{Kin} | J | Kinetische Energie |
| E_{Pot} | J | Potentielle Energie |
| F | | Hilfsfunktion zur Bestimmung der Bewegungsgleichung für die trapezförmige Tragseilanordnung |
| F_G | N | Gleitreibungskraft |
| F_H | N | Haftreibungskraft |
| F_{Hor} | N | Kraft in x -Koordinatenrichtung |
| F_R | N | Reibkraft bei trockener Reibung |
| g | m/s ² | Gravitationskonstante |
| G | | Gewichtung |
| h | m | Höhe des LAM unterhalb der Laufkatze |
| i | A | Strom |
| K | | Hilfsgröße zur Berechnung der Impuls-Amplitude |
| l | m | Tragseillänge |
| l_0 | m | Tragseillänge zum Beginn eines Verfahrenvorgangs |
| l_m | m | Mittelwert der Tragseillänge |
| L_{Modell} | m | Länge im Modell |
| L_{Real} | m | Länge im Original |
| m_K | kg | Masse der Laufkatze |
| m_L | kg | Masse des LAM inkl. Last |
| n | | Anzahl |
| n | | Umrechnungsfaktor |
| n_m | | Mittelwert des Umrechnungsfaktors für den Tragseilwinkel |
| p | bar | Druck |

| Zeichen | Einheit | Bedeutung |
|---------------------|-------------------|---|
| P | | Punktesumme |
| Q | W | Wärmestrom |
| \bar{q} | | Generalisierte Koordinate |
| \bar{Q} | N | Generalisierte Kraft |
| \bar{Q}_k | N | konservative Kräfte |
| \bar{Q}_n | N | nichtkonservative Kräfte |
| S | | Sicherheitsbeiwert |
| $S(\omega, D)$ | | Hilfsfunktion zur Bestimmung des Restschwingungsmaß |
| S_L | | Massenschwerpunkt |
| t_a | s | Zeitdauer Beschleunigung |
| t_e | s | Gesamte Verfahrszeit der Laufkatze |
| t_K | m/s | Zeitdauer mit konstanter Verfahrgeschwindigkeit |
| t_{Modell} | s | Zeit im Modell |
| t_{Real} | s | Zeit im Original |
| T | s | Periodendauer |
| T_d | s | Periodendauer der gedämpften Schwingung |
| U | V | Elektrische Spannung |
| v_H | m/s | Hubgeschwindigkeit |
| v_k | m/s | Verfahrgeschwindigkeit Laufkatze |
| v_{max} | m/s | Maximale Verfahrgeschwindigkeit der Laufkatze |
| v_S | m/s | Senkgeschwindigkeit |
| $V(\omega, D)$ | | Restschwingungsmaß |
| x | m | Verfahrstrecke der Laufkatze |
| α | Grad | Tragseilwinkel bei der trapezförmigen Tragseilanordnung |
| α_m | Grad | Mittelwert des Tragseilwinkels |
| β | Grad | Tragseilwinkel bei der trapezförmigen Tragseilanordnung |
| δ | Grad | Auslenkung des LAM bei der trapezförmigen Tragseilanordnung |
| Θ | kg m ² | Massenträgheitsmoment |
| μ | | Reibungskoeffizient |
| τ | | Hilfsgröße zur Bestimmung der Schaltzeitpunkte von <i>Strategie 4</i> |
| φ | Grad | Auslenkung des LAM bei einer parallelen Tragseilanordnung |
| φ_a | | Stufensprung der Beschleunigung |
| φ_K | Grad | Tragseilwinkel Laufkatze |
| φ_l | | Längenmaßstab |
| φ_t | | Stufensprung der Zeit |
| ω | rad/s | Eigenkreisfrequenz |
| ω_a | rad/s | Tatsächlich vorhandene Eigenkreisfrequenz |
| ω_t | rad/s | Theoretische Eigenkreisfrequenz |

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------------------|--|----|
| Abb. 2.1 | Systematik der realisierten Parksyste (in Anlehnung an /SAL00b/) | 3 |
| Abb. 2.2 | Hauptfluss (Stofffluss) eines vollautomatischen Parksystems | 4 |
| Abb. 2.3 | Horizontales Umlaufsystem /PEC06/ | 6 |
| Abb. 2.4 | Vertikales Umlaufsystem /PRI09/ | 6 |
| Abb. 2.5 | Regalsystem | 7 |
| Abb. 2.6 | Offener Turm | 7 |
| Abb. 2.7 | Liegender Turm | 7 |
| Abb. 2.8 | Gekippter Turm | 7 |
| Abb. 2.9 | Geschl. Turm | 7 |
| Abb. 2.10 | Radialsystem | 7 |
| Abb. 2.11 | Regalsystem von innen /PAR06/ | 7 |
| Abb. 2.12 | Offenes Turmsystem /WÖH06a/ | 7 |
| Abb. 2.13 | Geschl. Turmsystem /WÖH06b/ | 8 |
| Abb. 2.14 | Radialsystem von innen /PAL06/ | 8 |
| Abb. 2.15 | Systematische Gliederung der Fördermittel in Regalsystemen mit paralleler Anordnung der Stellplätze /SAL00a/ | 8 |
| Abb. 2.16 | Systematische Gliederung der Fördermittel in automatischen Parksyste (in Anlehnung an /SAL00a/) | 9 |
| Abb. 2.17 | Mechanismus zum Anheben eines PKW-Reifens mit rotatorisch verfahrenen Dornen | 10 |
| Abb. 2.18 | Mechanismus zum Anheben eines PKW mit einem Kamm | 10 |
| Abb. 2.19 | Klassifizierung der Lastführungssysteme (in Anlehnung an /KLE96/) | 11 |
| Abb. 2.20 | Fixierung der Last in oberster Hubstellung /KÜN07/ | 12 |
| Abb. 2.21 | Lastführung durch teleskopierbare Masten /KÜN07/ | 12 |
| Abb. 2.22 | Lastführung durch Scheren /KÜN07/ | 12 |
| Abb. 2.23 | Lastführung durch eine trapezförmige Anordnung der Tragseile /KÜN07/ | 12 |
| Abb. 2.24 | Pendelwinkelgeber über Messeil /THI96/ | 13 |
| Abb. 2.25 | Hall-Effekt-Sensor /SIE99/ | 13 |
| Abb. 2.26 | Pendelwinkelgeber am Tragseil /HEP02/ | 14 |
| Abb. 2.27 | Optische Pendelwinkelerfassung /LEH02/ | 14 |
| Abb. 4.1 | Globaler Lastpendelausgleich | 19 |
| Abb. 4.2 | Lokaler Lastpendelausgleich | 19 |
| Abb. 4.3 | Funktionsprinzip der Strategie 2 zum Beschleunigen auf die vorgegebene Maximalgeschwindigkeit | 20 |

| | | |
|------------------|---|----|
| Abb. 4.4 | Funktionsprinzip und Berechnungsvorschrift der Strategie 3 zum Beschleunigen auf die maximale Verfahrensgeschwindigkeit /PAT89/..... | 21 |
| Abb. 4.5 | Funktionsprinzip und Berechnungsvorschrift der Strategie 4 zum Beschleunigen auf die maximale Verfahrensgeschwindigkeit /BUC99/ | 22 |
| Abb. 4.6 | Anordnung der Beschleunigungs- und Verzögerungsintervalle bei einer zeitoptimalen Steuerungsstrategie mit vier Schaltzeitpunkten | 22 |
| Abb. 4.7 | Anordnung der Beschleunigungs- und Verzögerungsintervalle bei einer zeitoptimalen Steuerungsstrategie mit sechs Schaltzeitpunkten..... | 22 |
| Abb. 4.8 | Funktionsprinzip und Berechnungsvorschrift der Strategie 5 | 24 |
| Abb. 4.9 | Funktionsprinzip und Berechnungsvorschrift der Strategie 6 | 25 |
| Abb. 4.10 | Funktionsweise des Input-Shaping (in Anlehnung an /HUB09/) | 27 |
| Abb. 4.11 | Funktionsweise des ZV-Shaper (In Anlehnung an /FOR06/)..... | 27 |
| Abb. 4.12 | Sensitivitätskurven für ZV-, ZVD- und EI-Shaper /SIN97/ | 29 |
| Abb. 5.1 | Tragseilanordnung bei Kranen. (links: parallele Tragseilanordnung; rechts: trapezförmige Tragseilanordnung) | 30 |
| Abb. 5.2 | Skizze der parallelen Tragseilanordnung als Grundlage für die mathematische Modellbildung..... | 31 |
| Abb. 5.3 | Auslenkung des LAM bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung | 33 |
| Abb. 5.4 | Modell zur Simulation des Lastpendelns eines Krans mit paralleler Tragseilanordnung in SIMULINK..... | 37 |
| Abb. 5.5 | Modell zur Simulation des Lastpendelns eines Krans mit trapezförmigen Tragseilanordnung in SIMULINK..... | 38 |
| Abb. 5.6 | Vergleich der Simulationsergebnisse mit verschiedenen Simulationsmodellen bei einer Tragseillänge von $l = 13$ m | 39 |
| Abb. 6.1 | Positionierungszeit in Abhängigkeit der Tragseillänge für eine Geschwindigkeit von $v_K = 100$ m/min und einer Verfahrstrecke von 100 m (Bei einer Tragseillänge von 1 m können nicht alle Steuerungsstrategien angewendet werden)..... | 41 |
| Abb. 6.2 | Positionierungszeit in Abhängigkeit der Tragseillänge für eine Geschwindigkeit von $v_K = 50$ m/min und einer Verfahrstrecke von 100 m | 41 |
| Abb. 6.3 | Positionierungszeit in Abhängigkeit der Tragseillänge für eine Geschwindigkeit von $v_K = 50$ m/min und eine Verfahrstrecke von 30 m | 42 |
| Abb. 6.4 | Positionierungszeit in Abhängigkeit der Tragseillänge für eine Geschwindigkeit von $v_K = 10$ m/min und eine Verfahrstrecke von 30 m | 42 |
| Abb. 6.5 | Maximale Auslenkung während des Verfahrens bei einer maximalen Geschwindigkeit von $v_K = 10$ m/min..... | 43 |
| Abb. 6.6 | Maximale Auslenkung während des Verfahrens bei einer maximalen Geschwindigkeit von $v_K = 50$ m/min..... | 43 |

| | | |
|------------------|---|----|
| Abb. 6.7 | Maximale Auslenkung während des Verfahrens bei einer maximalen Geschwindigkeit von $v_K = 100$ m/min..... | 43 |
| Abb. 6.8 | Darstellung des Lastpendels für den Fall, dass das Verzögerungsintervall gleichzeitig mit dem maximalen Pendelausschlag beginnt. | 44 |
| Abb. 6.9 | Darstellung des Lastpendels für den Fall, dass das Verzögerungsintervall gleichzeitig mit dem Nulldurchgang des Lastpendels beginnt. | 44 |
| Abb. 6.10 | Auslenkung des LAM in Abhängigkeit der Verlagerung der Schaltzeitpunkte für eine Tragseillänge von $l = 10$ m und eine Verfahrensgeschwindigkeit $v_K = 50$ m/min..... | 45 |
| Abb. 6.11 | Maximale Positionsabweichung in Abhängigkeit der Tragseillänge bei $v_K = 50$ m/min..... | 45 |
| Abb. 6.12 | Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 5 und einer max. Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 10$ m/min..... | 46 |
| Abb. 6.13 | Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 5 und einer max. Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 50$ m/min..... | 46 |
| Abb. 6.14 | Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 5 und einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 100$ m/min. | 46 |
| Abb. 6.15 | Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 6 und einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 10$ m/min..... | 47 |
| Abb. 6.16 | Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 6 und einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 50$ m/min..... | 47 |
| Abb. 6.17 | Auslenkung des LAM nach der Positionierung in Abhängigkeit der Verlagerung des Verzögerungsintervalls bei der Anwendung von Strategie 6 und einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von $v_K = 100$ m/min. | 47 |
| Abb. 6.18 | Periodendauer in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze für unterschiedliche Tragseilwinkel und einem Schwerpunktabstand von $e = -0,5$ m..... | 48 |
| Abb. 6.19 | Periodendauer in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze für unterschiedliche Schwerpunktabstände und einem Tragseilwinkel von $\alpha = 15^\circ$ | 49 |
| Abb. 6.20 | Veränderung der Periodendauer in Abhängigkeit des Abstands zwischen dem Massenschwerpunkt und dem imaginären Seilschnittpunkt. | 49 |

| | | |
|------------------|--|----|
| Abb. 6.21 | Maximale Auslenkung des LAM während des Verfahrens in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei einem konstanten Trageiswinkel von $\alpha = 4^\circ$ und $v_K = 50$ m/min..... | 50 |
| Abb. 6.22 | Maximale Auslenkung des LAM während des Verfahrens in Abhängigkeit des Trageiswinkels, der Anwendung von Strategie 3 und $v_K = 100$ m/min..... | 50 |
| Abb. 6.23 | Trageisabstand d in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei unterschiedlichen Trageiswinkeln. | 51 |
| Abb. 6.24 | Auslenkung des LAM in Abhängigkeit der Trageislänge bei unterschiedlichen Trageiswinkeln, der Anwendung von Strategie 1 und $v_K = 50$ m/min. | 52 |
| Abb. 6.25 | Auslenkung des LAM in Abhängigkeit der Trageislänge bei unterschiedlichen Trageiswinkeln, der Anwendung von Strategie 4 und $v_K = 50$ m/min. | 52 |
| Abb. 6.26 | Auslenkung in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei einem konstanten Trageiswinkel von 2° und $v_K = 50$ m/min..... | 53 |
| Abb. 6.27 | Auslenkung in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei einem konstanten Trageiswinkel von 4° und $v_K = 50$ m/min..... | 53 |
| Abb. 6.28 | Auslenkung in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei einem konstanten Trageiswinkel von 2° und $v_K = 100$ m/min..... | 53 |
| Abb. 6.29 | Auslenkung in Abhängigkeit der Position des LAM unterhalb der Laufkatze bei einem konstanten Trageiswinkel von 4° und $v_K = 100$ m/min..... | 53 |
| Abb. 6.30 | Auslenkung des LAM in Abhängigkeit der Position unterhalb der Laufkatze und der Anwendung von Strategie 5 bei $v_K = 100$ m/min..... | 54 |
| Abb. 6.31 | Auslenkung des LAM in Abhängigkeit der Position unterhalb der Laufkatze und der Anwendung von Strategie 6 bei $v_K = 100$ m/min..... | 54 |
| Abb. 6.32 | Schwingungsdämpfung und -anregung infolge des Hebens oder Senkens der Last..... | 55 |
| Abb. 6.33 | Prozentuale Änderung der Positionierungszeiten beim Verfahren der Laufkatze und gleichzeitigem Heben und Senken der Last im Vergleich zu der Positionierung mit konstanter Trageislänge..... | 56 |
| Abb. 6.34 | Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens, bei gleichzeitigem Heben der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Trageislänge. | 58 |
| Abb. 6.35 | Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens und Heben der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Lasthub: 10 m; $v_H = 50$ m/min; $a_H = 0,2$ m/s ²). | 59 |

| | | |
|------------------|--|----|
| Abb. 6.36 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Heben der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 ohne Anpassung an eine veränderliche Tragseillänge..... | 60 |
| Abb. 6.37 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Senken der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 ohne Anpassung an eine veränderliche Tragseillänge..... | 60 |
| Abb. 6.38 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Heben der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Tragseillänge. | 62 |
| Abb. 6.39 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Senken der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Tragseillänge. | 62 |
| Abb. 6.40 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren und Heben der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Lasthub: 10 m; $v_H = 50$ m/min; $a_H = 0,2$ m/s ²)..... | 63 |
| Abb. 6.41 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren und Senken der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Senkbewegung = 10 m; $v_S = 50$ m/min; $a_S = 0,2$ m/s ²). | 63 |
| Abb. 6.42 | Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens, bei gleichzeitigem Heben der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Tragseillänge..... | 65 |
| Abb. 6.43 | Maximale Pendelauslenkung während des Verfahrens und Heben der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Lasthub: 10 m; $v_H = 50$ m/min; $a_H = 0,2$ m/s ²). | 66 |
| Abb. 6.44 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Heben der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 ohne Anpassung an eine veränderliche Tragseillänge..... | 67 |
| Abb. 6.45 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Senken der Last und der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 ohne Anpassung an eine veränderliche Tragseillänge..... | 67 |
| Abb. 6.46 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Heben der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Tragseillänge. | 68 |
| Abb. 6.47 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren, bei gleichzeitigem Senken der Last, der Anwendung von Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 und der Berechnung der Schaltzeitpunkte mit dem Mittelwert der Tragseillänge. | 68 |

| | | |
|------------------|--|----|
| Abb. 6.48 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren und Heben der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Lasthub: 10 m; $v_H = 50$ m/min; $a_H = 0,2$ m/s ²)..... | 69 |
| Abb. 6.49 | Pendelauslenkung nach dem Verfahren und Senken der Last, bei der Anwendung des Input-Shaping (Senkbewegung: 10 m; $v_S = 50$ m/min; $a_S = 0,2$ m/s ²). | 70 |
| Abb. 7.1 | Isometrische Darstellung des Modellkrans und Foto des Hubwerks..... | 77 |
| Abb. 7.2 | Winkel und Beschleunigung des LAM bei einer manuellen Auslenkung und einer parallelen Tragseilanordnung mit $l = 1,5$ m..... | 78 |
| Abb. 7.3 | Maximale Auslenkungen nach dem Verfahren im Modellversuch und der Simulation, bei einer parallelen Tragseilanordnung und einer Tragseillänge von $l = 1$ m. | 79 |
| Abb. 7.4 | Maximale Auslenkungen nach dem Verfahren im Modellversuch und der Simulation, bei einer parallelen Tragseilanordnung und einer Tragseillänge von $l=1,5$ m. | 80 |
| Abb. 7.5 | Maximale Auslenkungen nach dem Verfahren im Modellversuch und der Simulation, bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung und einem Abstand des LAM zur Laufkatze von $h = 1$ m..... | 80 |
| Abb. 7.6 | Maximale Auslenkung nach dem Verfahren im Modellversuch und der Simulation, bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung und einem Abstand des LAM zur Laufkatze von $h = 1,5$ m..... | 80 |
| Abb. 7.7 | Maximale Auslenkungen während des Verfahrens im Modellversuch und der Simulation, bei einer parallelen Tragseilanordnung und einer Tragseillänge von $l = 1$ m. | 81 |
| Abb. 7.8 | Maximale Auslenkungen während des Verfahrens im Modellversuch und der Simulation, bei einer parallelen Tragseilanordnung und einer Tragseillänge von $l = 1,5$ m. | 82 |
| Abb. 7.9 | Maximale Auslenkungen während des Verfahrens im Modellversuch und der Simulation, bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung und einem Abstand des LAM zur Laufkatze von $h = 1$ m..... | 82 |
| Abb. 7.10 | Maximale Auslenkungen während des Verfahrens im Modellversuch und in der Simulation, bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung und einem Abstand des LAM zur Laufkatze von $h = 1,5$ m..... | 82 |
| Abb. 7.11 | Unterteilung eines Geschwindigkeitsverlaufs in mehrere Intervalle mit konstanter Geschwindigkeit..... | 83 |
| Abb. 7.12 | Beispiel für die Auswirkung von Drehschwingungen auf die Pendelauslenkungen (die Drehschwingungen wurden hier durch eine unsymmetrische Tragseilaufhängung verstärkt)..... | 84 |

| | | |
|------------------|--|----|
| Abb. 7.13 | Pendelschwingung im Modell und der Simulation bei einer manuellen Auslenkung des LAM und einem Lasthub von 0,5 m, einer Tragseillänge $l_0 = 1,5$ m zum Beginn der Hubbewegung und einer Hubgeschwindigkeit von 52 mm/s..... | 86 |
| Abb. 7.14 | Pendelschwingung im Modell und der Simulation bei der manuellen Auslenkung des LAM und einem Senken der Last um 0,5 m, einer Tragseillänge $l_0 = 1$ m zum Beginn des Senkvorgangs und einer Senkgeschwindigkeit von 52 mm/s. | 86 |
| Abb. 7.15 | Maximale Auslenkung während der Positionierung in den Modellexperimenten und den Simulationen, bei dem Heben (links) und Senken (rechts) des LAM und einer parallelen Tragseilanordnung. | 88 |
| Abb. 7.16 | Maximale Auslenkung nach der Positionierung in den Modellexperimenten und den Simulationen, bei dem Heben (links) und Senken (rechts) des LAM und einer parallelen Tragseilanordnung. | 88 |
| Abb. 7.17 | Maximale Auslenkungen während der Positionierung in den Modellexperimenten und den Simulationen, bei dem Heben (rechts) und Senken (links) des LAM und einer trapezförmigen Tragseilanordnung. | 89 |
| Abb. 7.18 | Maximale Auslenkungen nach der Positionierung in den Modellexperimenten und den Simulationen, bei dem Heben (rechts) und Senken (links) des LAM und einer trapezförmigen Tragseilanordnung. | 89 |
| Abb. 7.19 | Maximale Auslenkungen nach dem Verfahren bei der Verlagerung von einer oder zwei Tragseilaufhängungen im Modell und einer maximalen Verfahrgeschwindigkeit von $v_K = 263$ mm/s. | 91 |
| Abb. 7.20 | Maximale Auslenkung nach dem Verfahren bei einer parallelen Tragseilanordnung, einer Beeinflussung der Tragseilbelastung und einer Verfahrgeschwindigkeit von 263 mm/s..... | 92 |
| Abb. 7.21 | Maximale Auslenkung nach dem Verfahren bei einer parallelen Tragseilanordnung, einer Beeinflussung der Tragseilbelastung und einer Verfahrgeschwindigkeit von 526 mm/s..... | 92 |
| Abb. 7.22 | Maximale Auslenkung nach dem Verfahren bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung, einer Beeinflussung der Tragseilbelastung und einer Verfahrgeschwindigkeit von 263 mm/s..... | 93 |
| Abb. 7.23 | Maximale Auslenkung nach dem Verfahren bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung, einer Beeinflussung der Tragseilbelastung und einer Verfahrgeschwindigkeit von 526 mm/s..... | 93 |
| Abb. 7.24 | LAM mit IR-Distanzsensoren..... | 94 |
| Abb. 7.25 | Beispiel einer Messung, bei der nur Längsschwingungen vorhanden sind. Parameter der Messung: $l=1$ m; parallele Tragseilanordnung; Strategie 6; $v_K = 263$ mm/s..... | 95 |

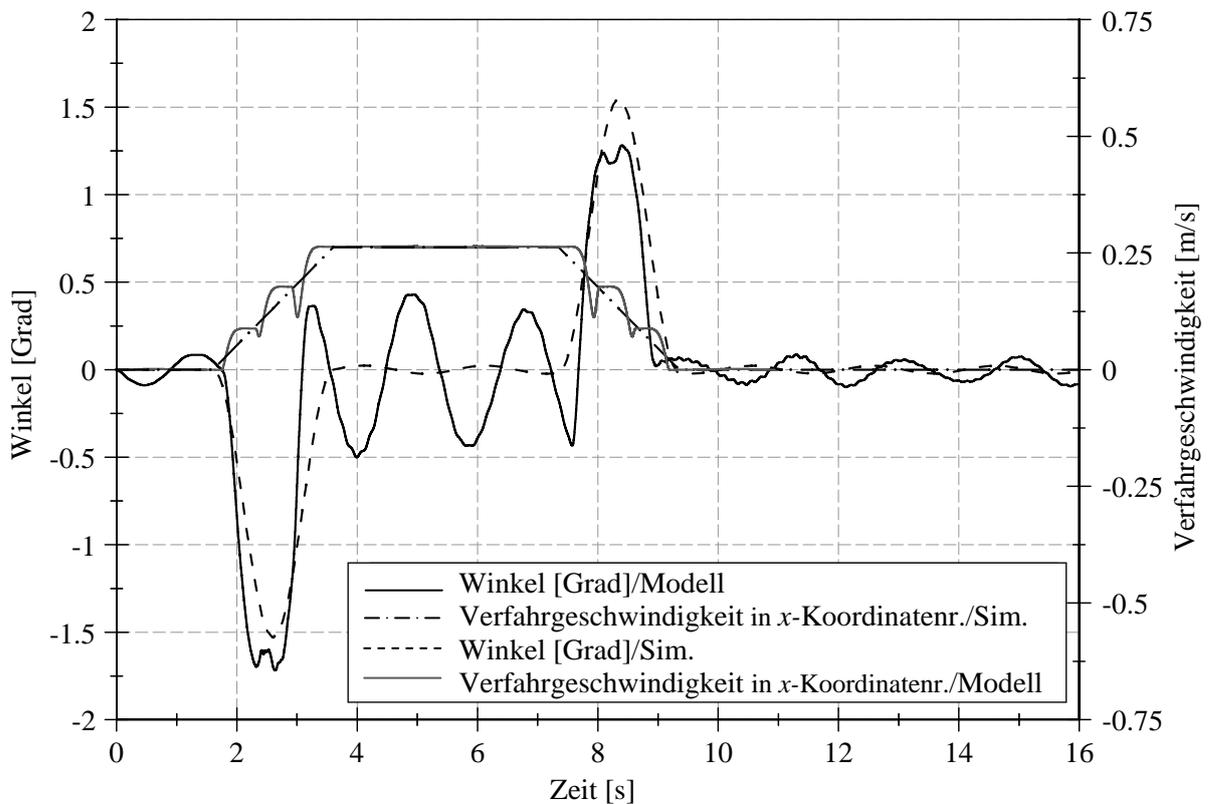
| | | |
|------------------|---|-----|
| Abb. 7.26 | Beispiel einer Messung, bei der Drehschwingungen vorhanden sind. Parameter der Messung: $l=1,5$ m; parallele Tragseilanordnung; Strategie 1; $v_K = 263$ mm/s; Verlagerung des Massenschwerpunkts..... | 95 |
| Abb. 7.27 | Maximale Schwingungsauslenkungen in y-Koordinatenrichtung bei einer Tragseillänge von $l = 1$ m. | 96 |
| Abb. 7.28 | Maximale Schwingungsauslenkungen in y-Koordinatenrichtung bei einer Tragseillänge von $l = 1,5$ m. | 97 |
| Abb. 8.1 | Simulationsergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5, einer parallelen Tragseilanordnung mit einer Senkbewegung von 20 m, einer Senkgeschwindigkeit von 50 m/min und einer Senkbeschleunigung von $0,2$ m/s ² | 101 |
| Abb. 8.2 | Funktionsstruktur der Positionierungsvorrichtung | 102 |
| Abb. 8.3 | Prinziplösung I; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.1-2.2.4-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1 | 106 |
| Abb. 8.4 | Prinziplösung II; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.1-2.1.2-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1 ... | 106 |
| Abb. 8.5 | Prinziplösung III; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.1-2.2.1-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1..... | 106 |
| Abb. 8.6 | Prinziplösung IV; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.2-2.2.2-3.1.4-3.2.2-4.1.4-4.2.2 | 106 |
| Abb. 8.7 | Prinziplösung V; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.2-2.2.2-3.1.2-3.2.2-4.1.2-4.2.2 .. | 106 |
| Abb. 8.8 | Prinziplösung VI; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.3-2.2.4-3.1.4-3.2.2-4.1.4-4.2.2 | 106 |
| Abb. 8.9 | Prinziplösung VII; Teilfunktionen: 1.3.1-2.1.3-2.2.4-3.1.4-3.2.1-4.1.4-4.2.1 ... | 106 |
| Abb. 8.10 | Prinziplösung VIII Teilfunktionen: 1.4.1-2.1.1-2.2.4-3.1.4-3.2.1-4.1.4- 4.2.1... | 107 |
| Abb. 8.11 | Prinziplösung IX; Teilfunktionen: 1.1.4-2.1.1-2.2.2-3.1.4-3.2.1-4.1.4- 4.2.1 ... | 107 |
| Abb. 8.12 | Prinziplösung X; Teilfunktionen: 1.1.2-2.1.1-2.2.1-3.1.4-3.2.1-4.1.4- 4.2.1..... | 107 |
| Abb. 8.13 | Prinziplösung XI; Teilfunktionen: 1.1.5-2.1.1-2.2.1-3.1.4-3.2.1-4.1.4- 4.2.1 ... | 107 |
| Abb. 8.14 | Dämpferkraftverlauf in Abhängigkeit der Schwingungsgeschwindigkeit (in Anlehnung an /VDI09/)..... | 111 |
| Abb. 8.15 | Simulierte Auslenkung des LAM im beladenen und unbeladenen Zustand nach der Positionierung und dem Einsatz der Positionierungsvorrichtung. Systemparameter: $c = 84$ kN/m, $d = 26$ kNs/m..... | 113 |
| Abb. 8.16 | Anwendung der Positionierungsvorrichtung bei der Pendelbewegung aus Abb. 8.1 | 113 |
| Abb. 8.17 | LAM mit Positionierungsvorrichtungen für den Transport von PKWs in einem automatischen Parksystem (in der Darstellung ist nur die Transfereinheit der oberen Palettenebenen dargestellt)..... | 114 |
| Abb. 8.18 | Darstellung des LAM nach der Positionierung zu einem Container | 115 |
| Abb. 8.19 | Untersicht des LAM..... | 115 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----------------|--|-----|
| Tab. 6.1 | Prozentuale Verlängerung der Positionierungszeiten bei der Anwendung des Input-Shaping | 57 |
| Tab.6. 2 | Vor- und Nachteile der Steuerungsstrategien aus Kap. 4.1 bei einer konstanten Tragseillänge (++ = sehr gut; + = gut; +- = befriedigend; - = bedingt geeignet; - - =nicht geeignet) | 73 |
| Tab. 7.1 | Gegenüberstellung der gemessenen und der theoretischen Periodendauer | 78 |
| Tab. 8.1 | Morphologischer Kasten zur Entwicklung von Prinziplösungen für die Positionierungsvorrichtung (Wirkprinzipien in Anlehnung an /KOL98/)..... | 104 |
| Tab. 8.2 | Festlegung von Erfüllungsgraden und Werten zu den Bewertungskriterien..... | 109 |
| Tab. 8.3 | Bewertungsmatrix | 110 |

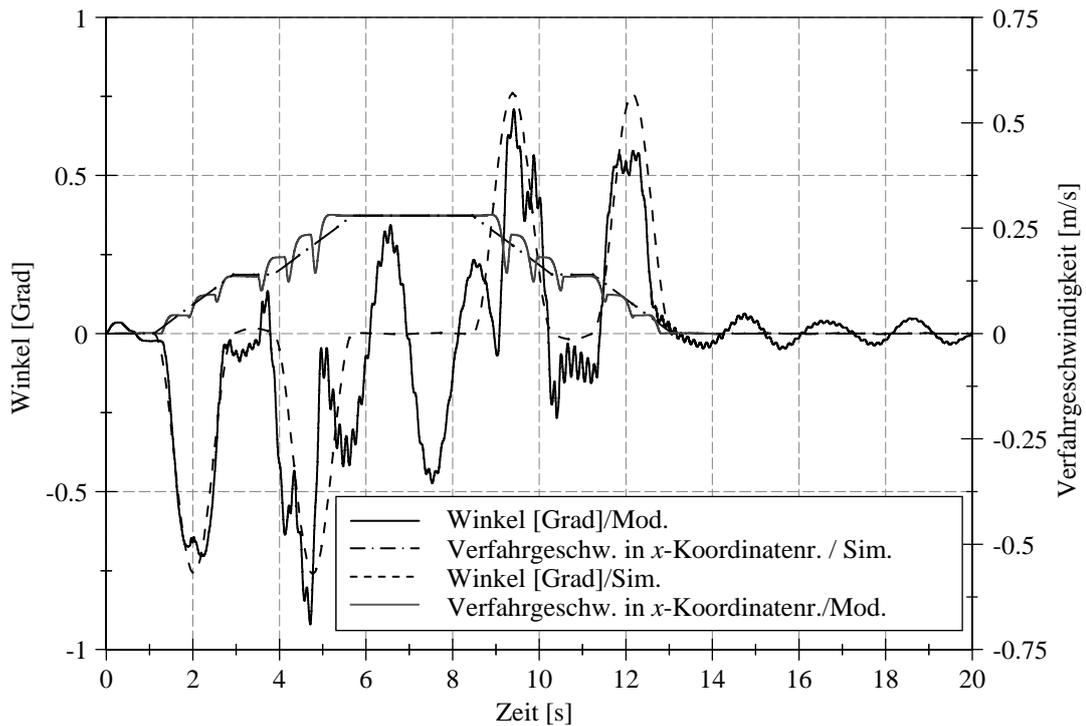
Anhang

Ergebnisse der Modellversuche bei einer paralleler Tragseilanordnung und einer konstanten Tragseillänge



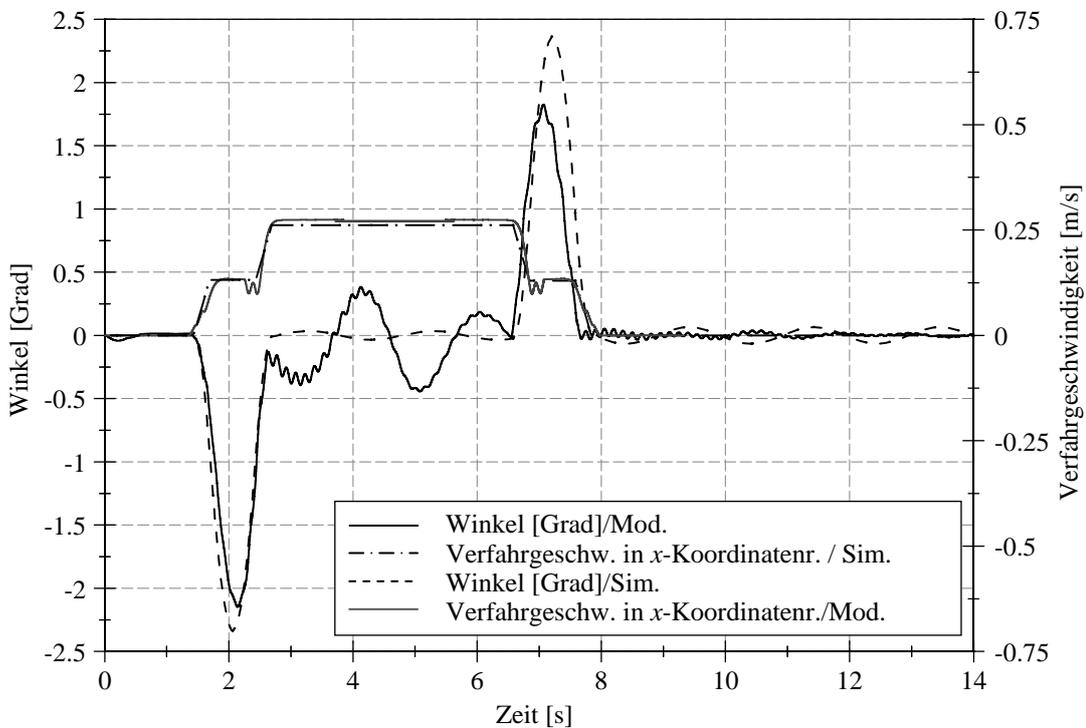
| | | | |
|-----------------------------|-------------|--|---|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,009°/0,02° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Besch. (Sim./Modell): | 0,46°/0,02° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 1,50°/1,56° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Modell): | 1,5 m/s ² / 0,026 m/s ² |

Abb. A.1 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1



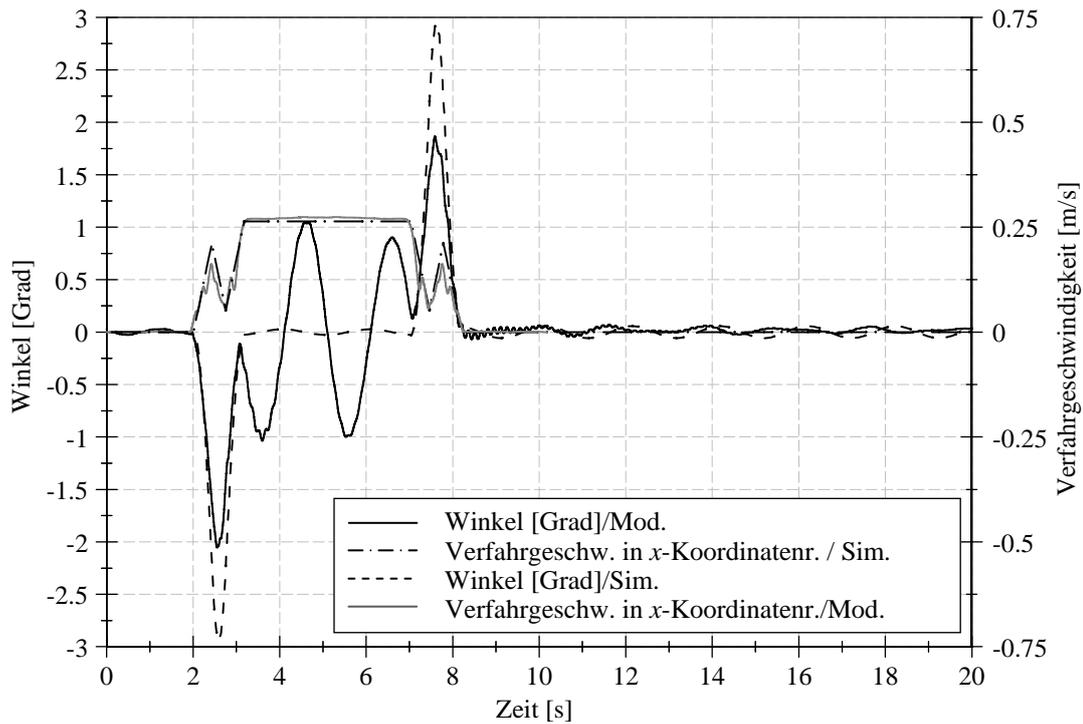
| | | | |
|------------------------------|------------|--|---|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,0013°/0,05° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,002°/0,37° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 0,76°/0,8° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,033 m/s ² / 0,2 m/s ² |

Abb. A.2 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2



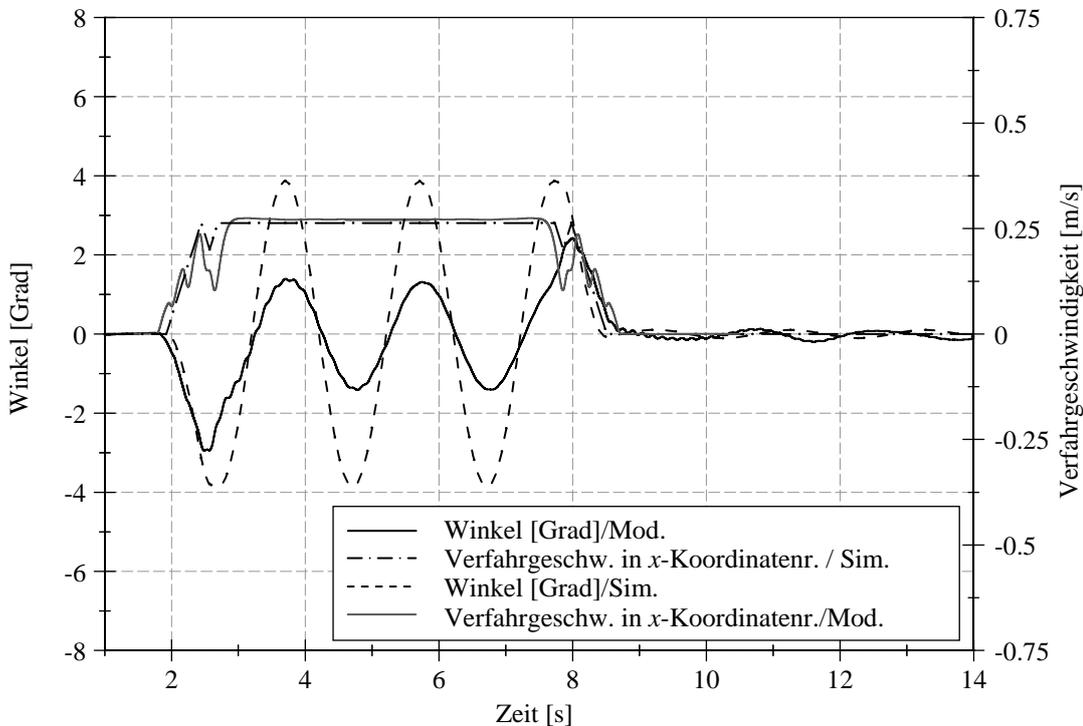
| | | | |
|------------------------------|--------------|--|---|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,065°/0,053° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,034°/0,41° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 2,34°/ 1,95° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,39 m/s ² / 0,02 m/s ² |

Abb. A.3 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3



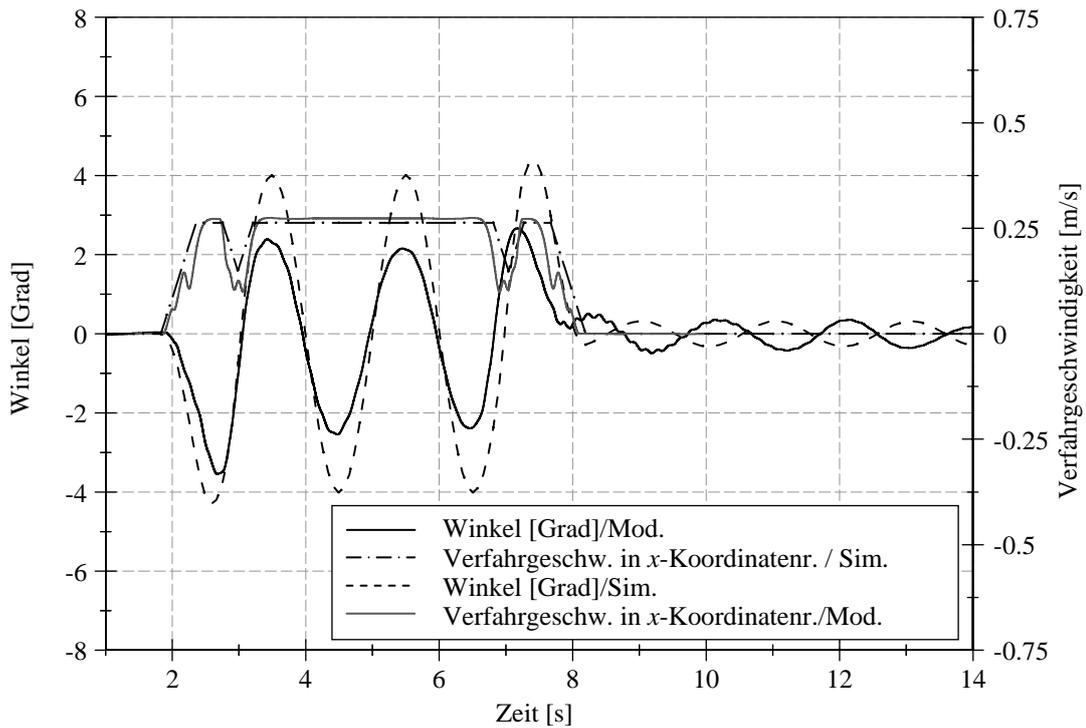
| | | | |
|------------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,06°/0,12° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,05°/1,04° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 2,95°/1,96° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,40 m/s ² /0,02 m/s ² |

Abb. A.4 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4



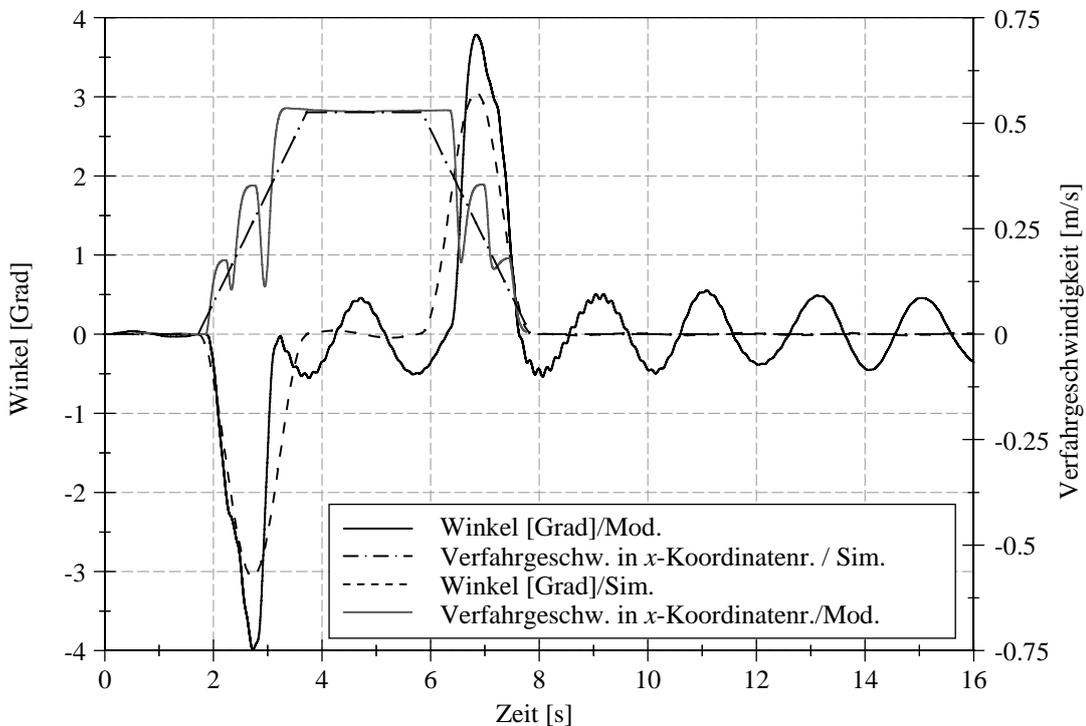
| | | | |
|------------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,11°/0,16° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 3,87°/1,4° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 3,85°/2,68° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,57 m/s ² /0,04 m/s ² |

Abb. A.5 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5



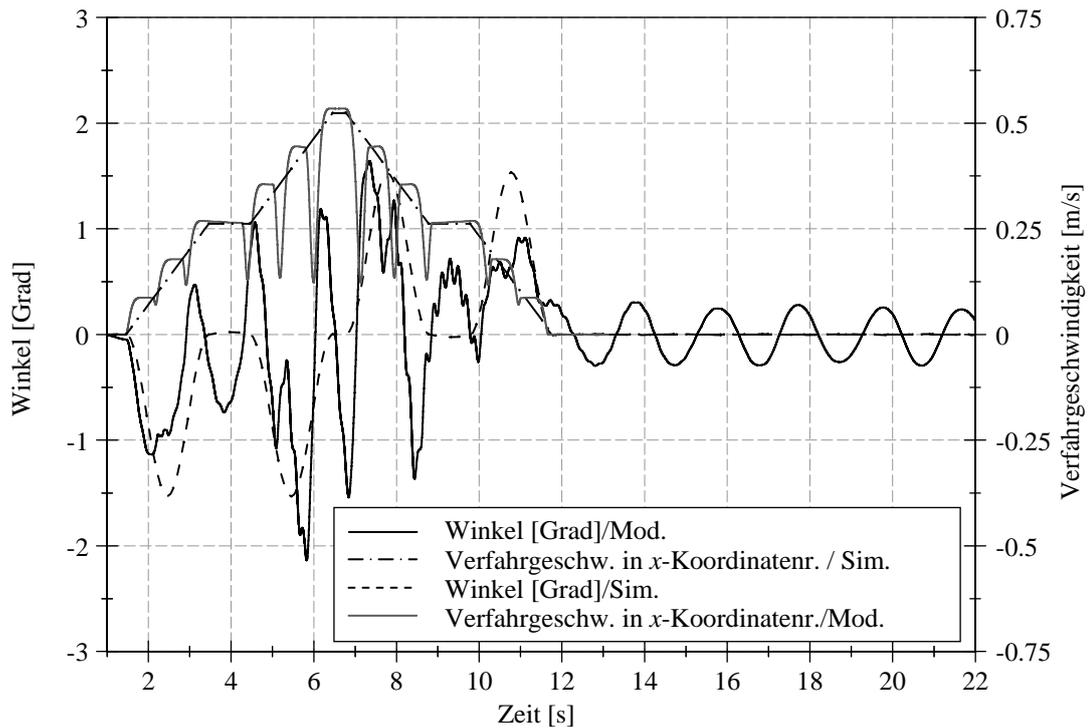
| | | | |
|------------------------------|------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,32°/0,43° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 4,02°/2,47° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 4,38°/3,1° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,69 m/s ² /0,11 m/s ² |

Abb. A.6 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6



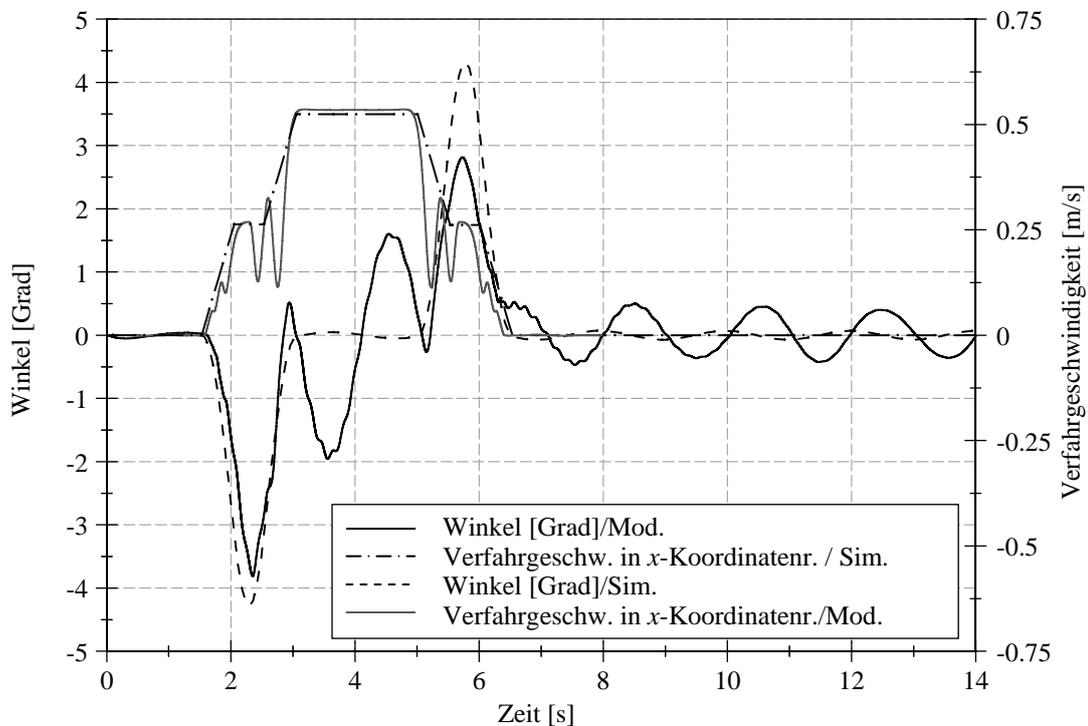
| | | | |
|------------------------------|-------------|--|---|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,01°/0,51° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,05°/0,505° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 3,06°/3,88° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,80 m/s ² /0,1 m/s ² |

Abb. A.7 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1



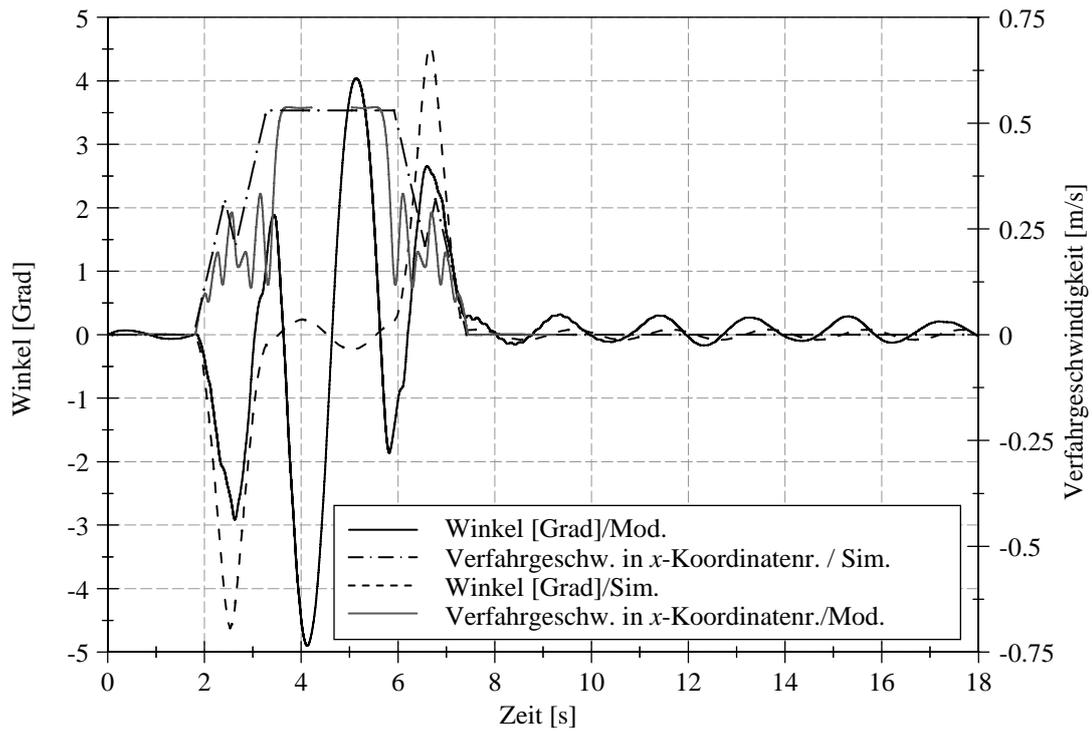
| | | | |
|-----------------------------|-------------|--|---|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,04°/0,30° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,02°/1,36° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 1,53°/1,89° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,44 m/s ² /0,089 m/s ² |

Abb. A.8 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2



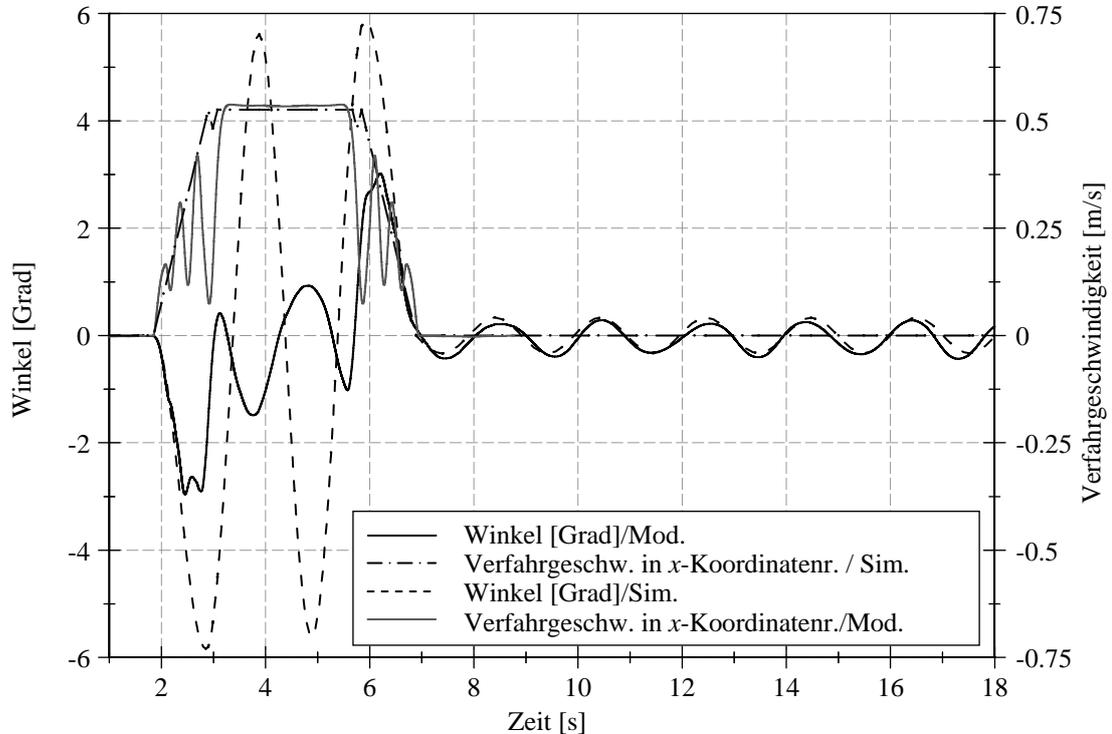
| | | | |
|-----------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,07°/0,48° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,05°/1,77° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 4,33°/3,31° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,64 m/s ² /0,12 m/s ² |

Abb. A.9 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3



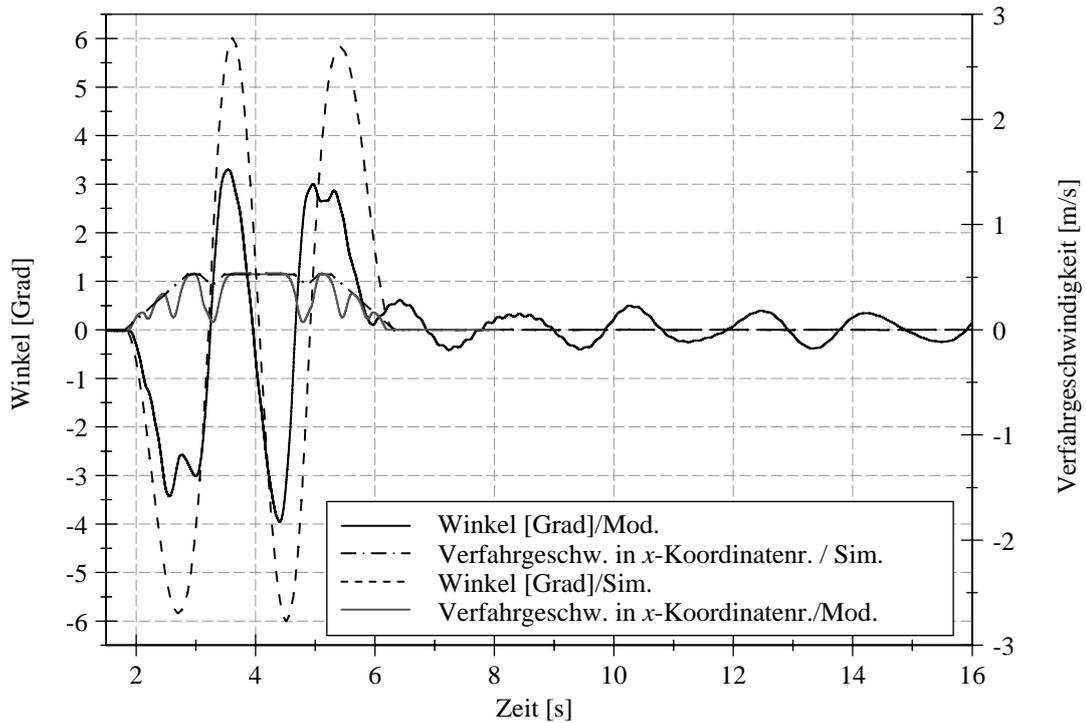
| | | | |
|------------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,09°/0,243° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,24°/4,45° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 4,54°/4,45° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,92 m/s ² /0,07 m/s ² |

Abb. A.10 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4



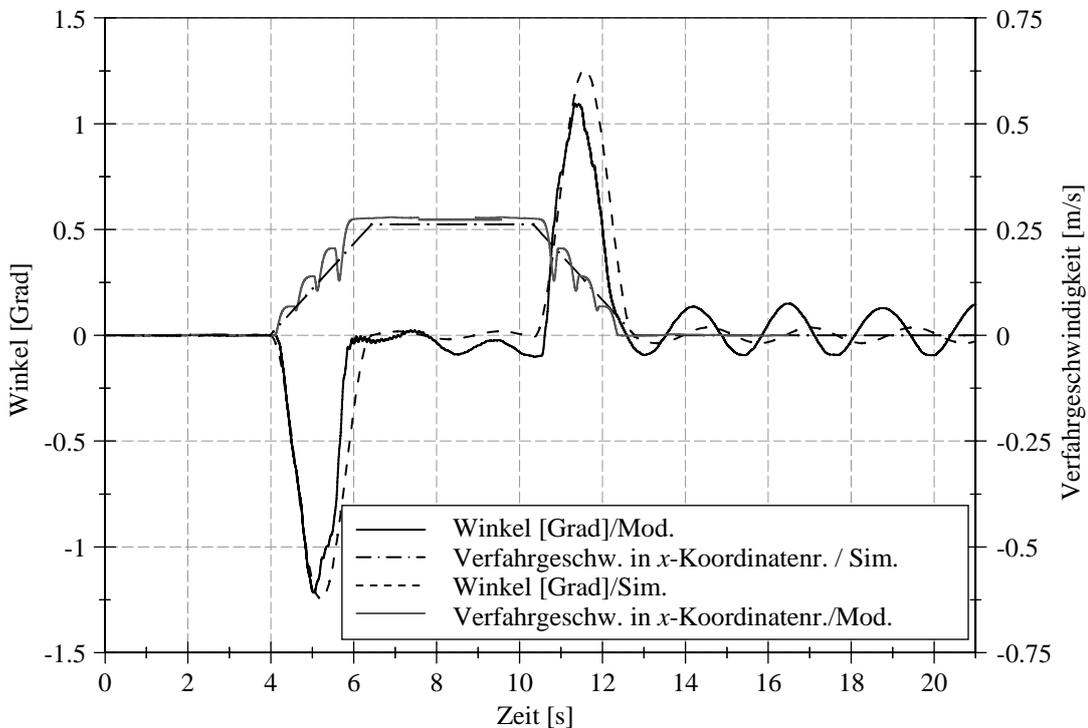
| | | | |
|------------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,34°/0,34° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 5,65°/1,21° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 5,86°/2,99° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,73 m/s ² /0,09 m/s ² |

Abb. A.11 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5



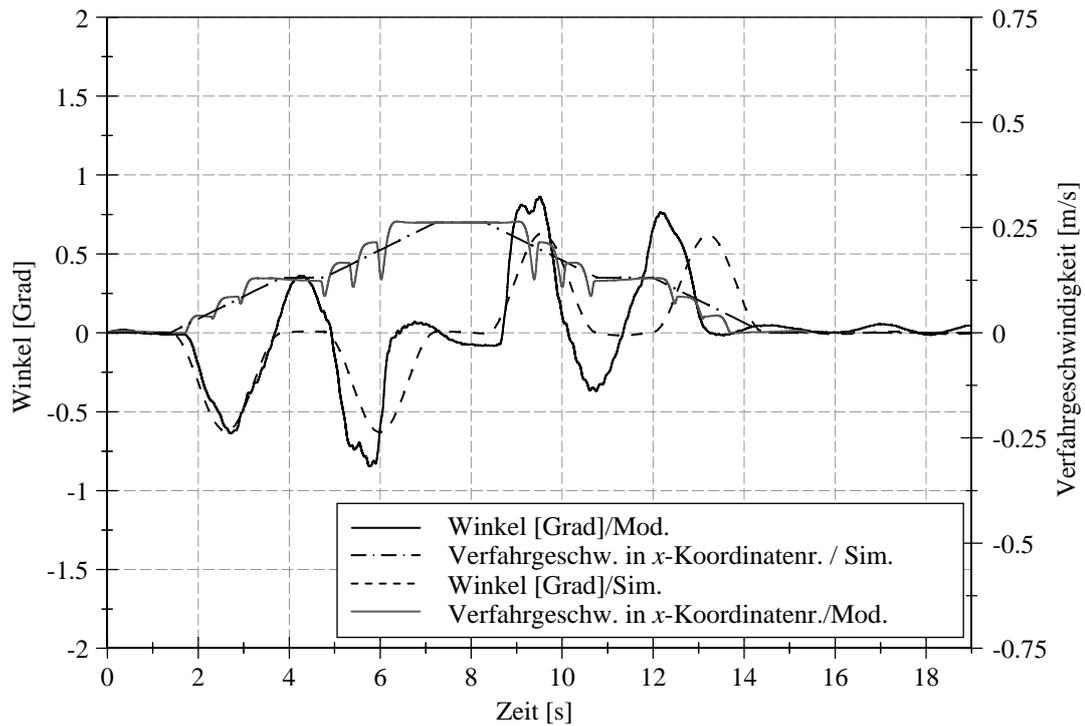
| | | | |
|-----------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,004°/0,45° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 6,00°/3,63° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 6,00°/3,63° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 1,76 m/s ² /0,24 m/s ² |

Abb. A.12 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6



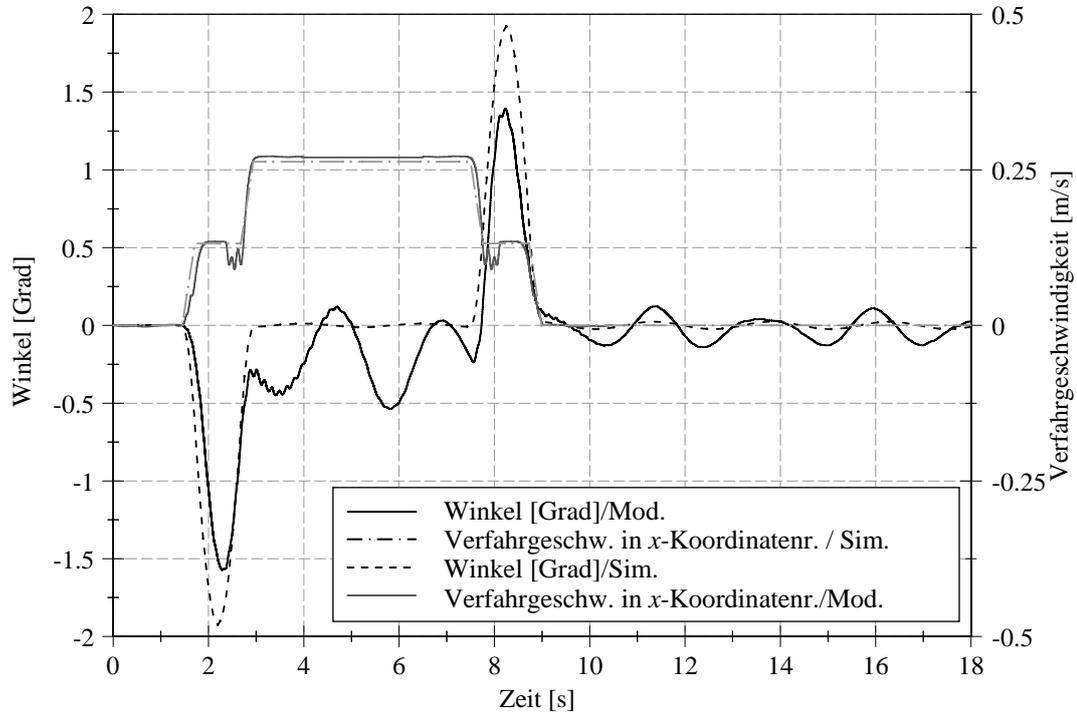
| | | | |
|-----------------------------|--------------|--|---|
| Tragseillänge l : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,04°/0,114° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,018°/0,054° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 0,037°/1,22° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,27 m/s ² /0,044 m/s ² |

Abb. A.13 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1



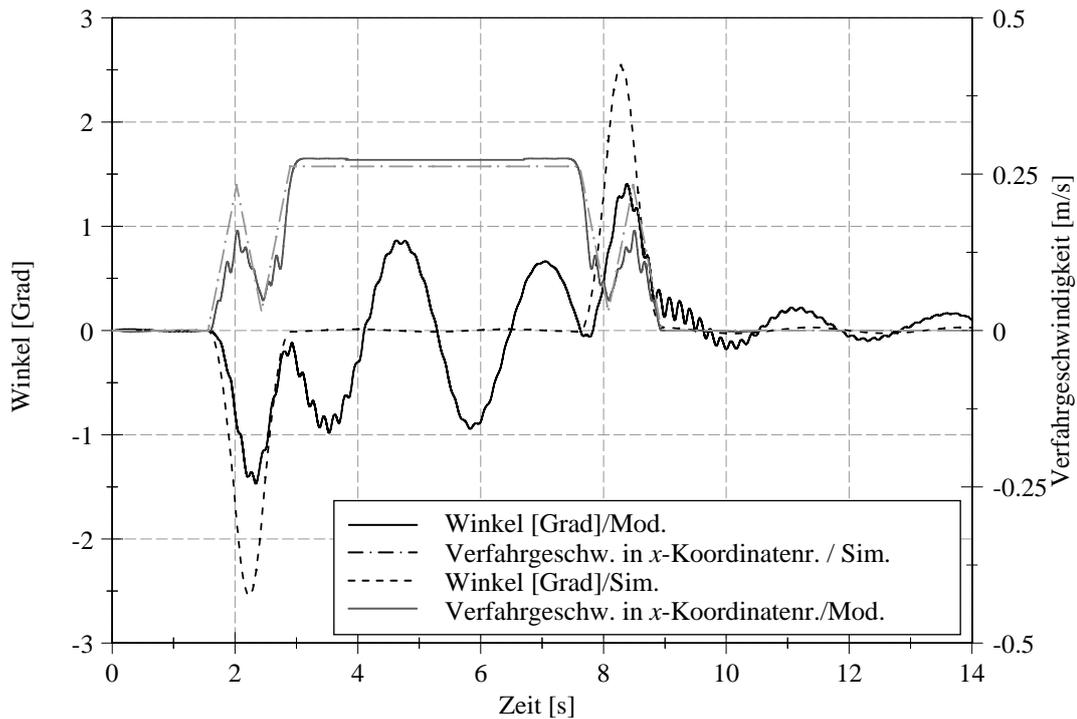
| | | | |
|-----------------------------|------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,007°/0,025° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,007°/0,076° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 0,63/0,86° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,19 m/s ² / 0,02 m/s ² |

Abb. A.14 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2



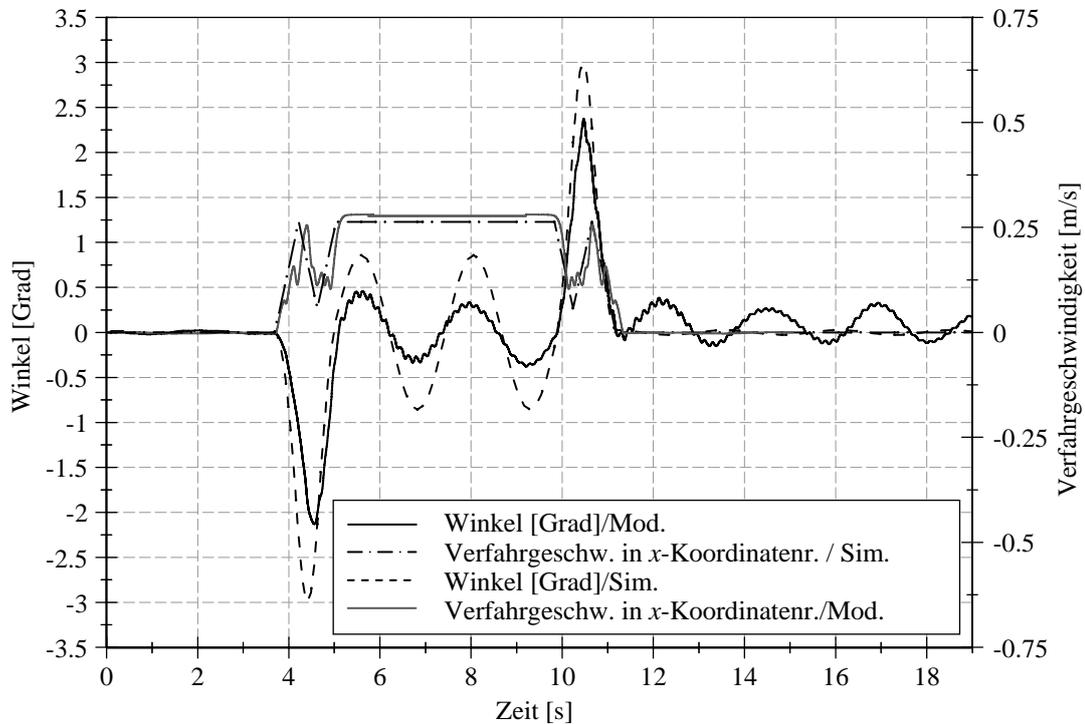
| | | | |
|-----------------------------|-----------------|--|---|
| Tragseillänge l : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,024°/0,123° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,01°/0,120° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 0,99°/ 1,37° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,34m/s ² / 0,02 m/s ² |

Abb. A.15 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3



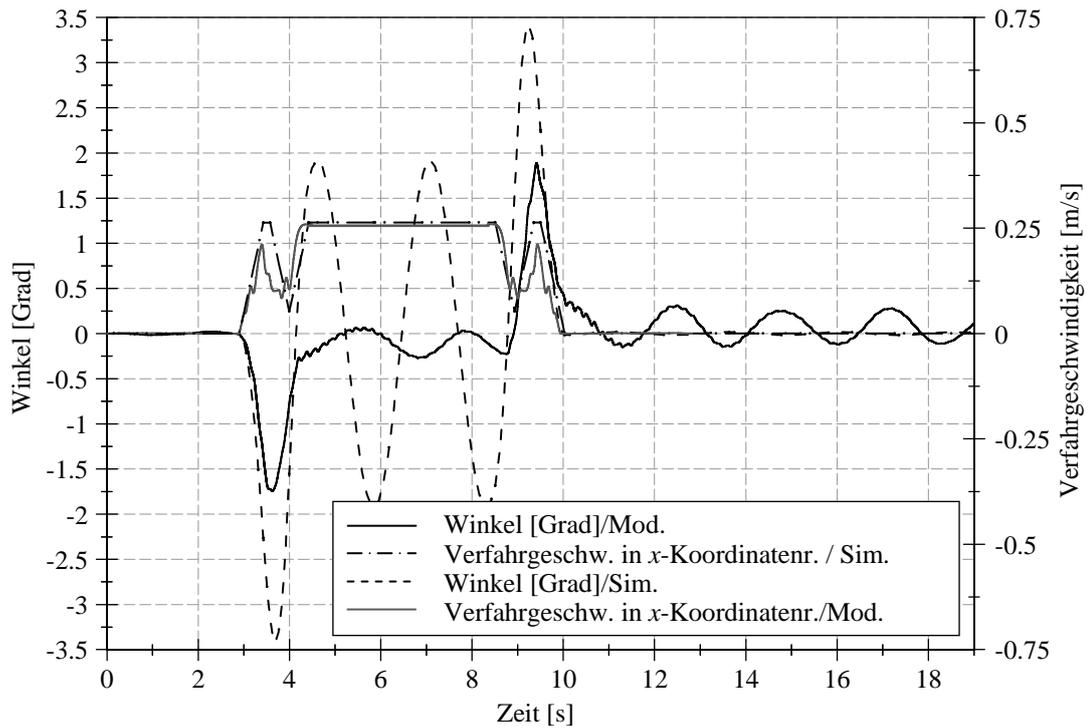
| | | | |
|-----------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1,5 | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,03°/0,147° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,01°/0,886° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 2,55°/1,47° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,34 m/s ² /0,06 m/s ² |

Abb. A.16 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4



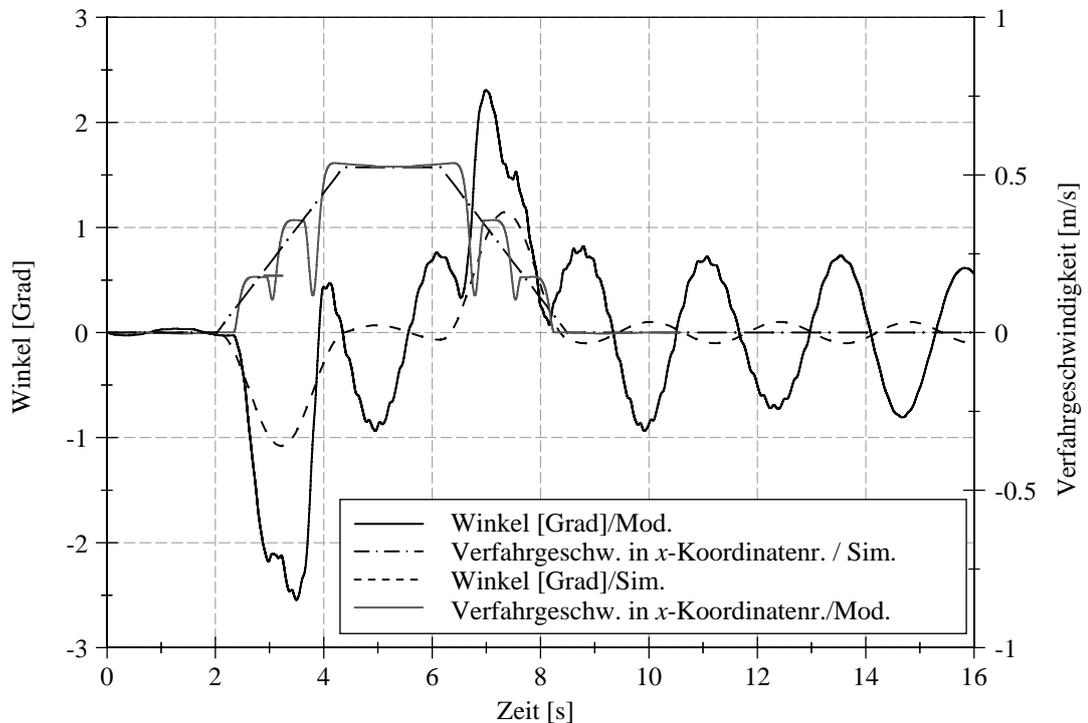
| | | | |
|-----------------------------|-------------|--|---|
| Tragseillänge l : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,02°/0,247° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,85°/0,397° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 2,98°/2,37° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,49 m/s ² /0,057 m/s ² |

Abb. A.17 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5



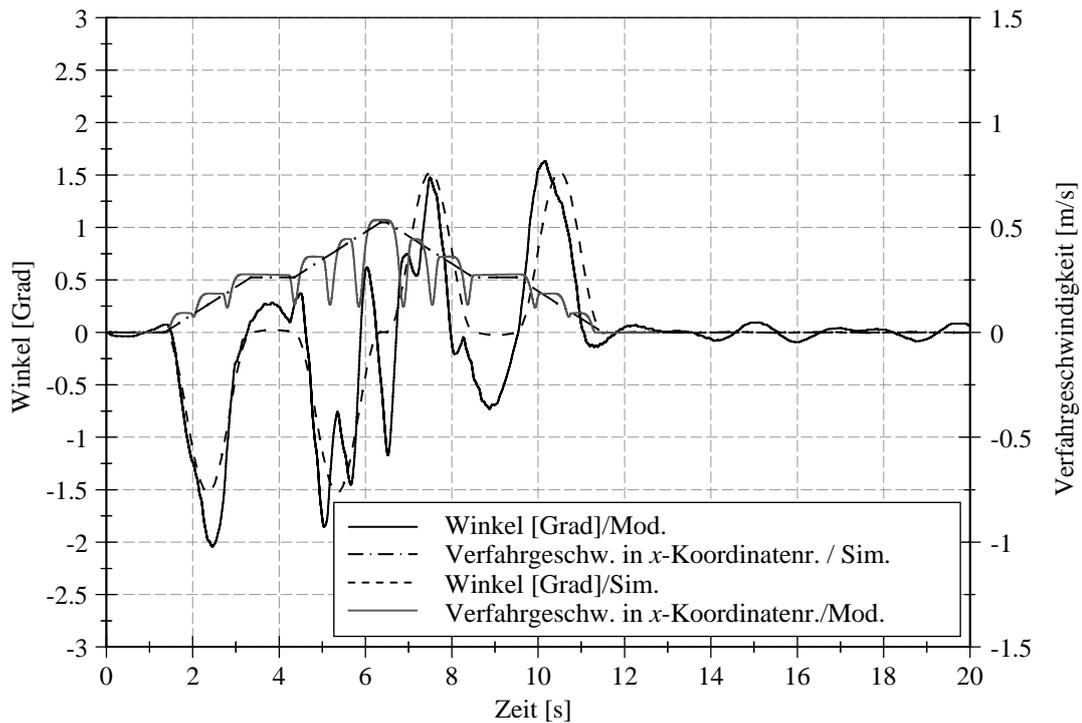
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| Tragseillänge l : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,02°/0,188° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 1,92°/0,147° |
| Max: Winkel | 3,42°/ | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der | 0,40 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 1,88° | Pos.; Mod.): | 0,06 m/s ² |

Abb. A.18 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6



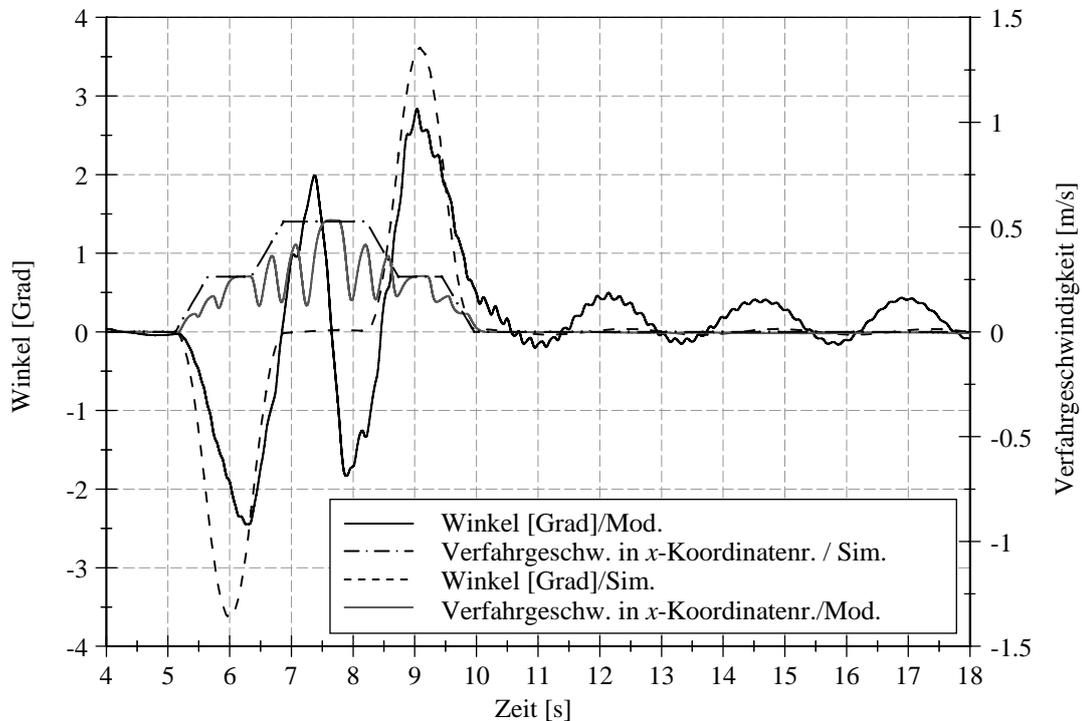
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| Tragseillänge l : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,10°/0,83° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,07°/0,85° |
| Max: Winkel | 1,15°/ | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der | 0,50 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 2,43° | Pos.; Mod.): | 0,35 m/s ² |

Abb. A.19 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1



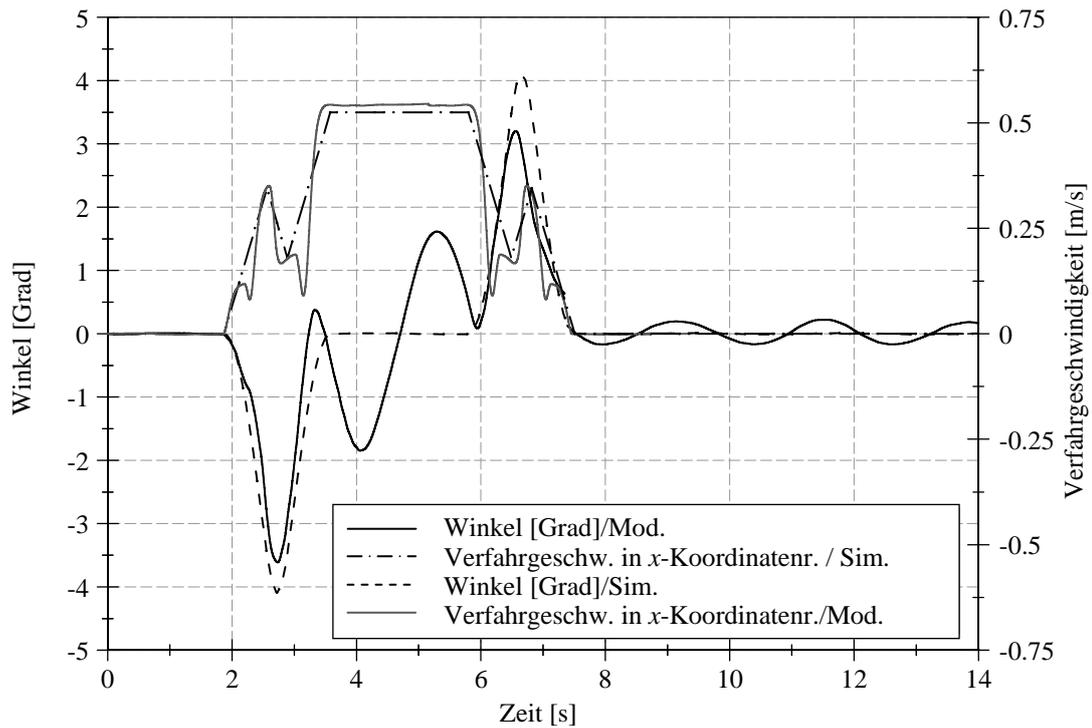
| | | | |
|-----------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,004°/0,10° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,002°/1,66° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 1,53°/1,83° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,37 m/s ² /0,03 m/s ² |

Abb. A.20 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2



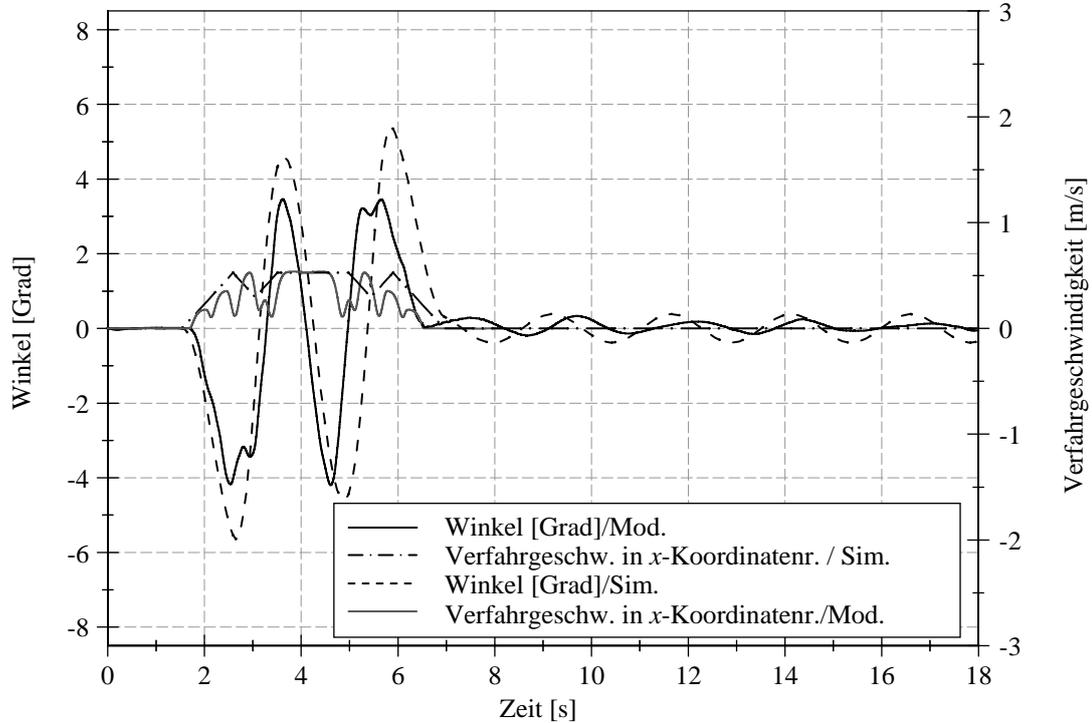
| | | | |
|-----------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,04°/0,32° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,02°/1,91° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 3,62°/2,64° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,51 m/s ² /0,10 m/s ² |

Abb. A.21 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3



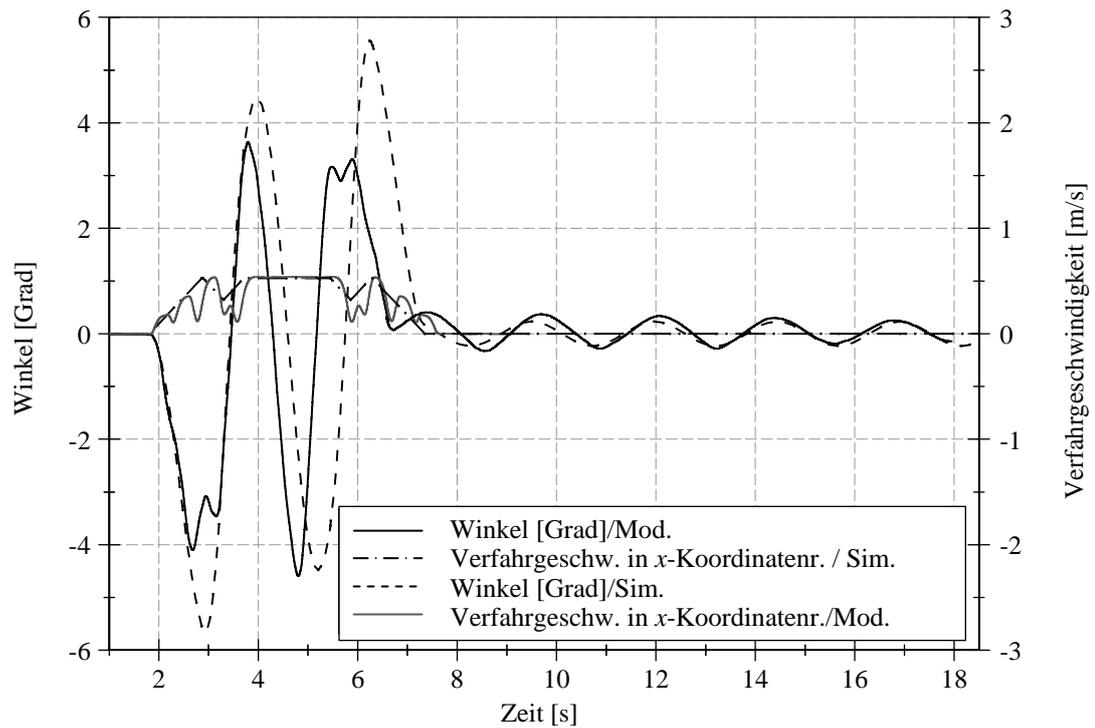
| | | | |
|------------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,01°/0,2° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,007°/1,74° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 4,10°/3,40° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,66 m/s ² /0,06 m/s ² |

Abb. A.22 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4



| | | | |
|------------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,23°/0,17° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 4,48°/4,12° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 5,40°/4,12° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,74 m/s ² /0,05 m/s ² |

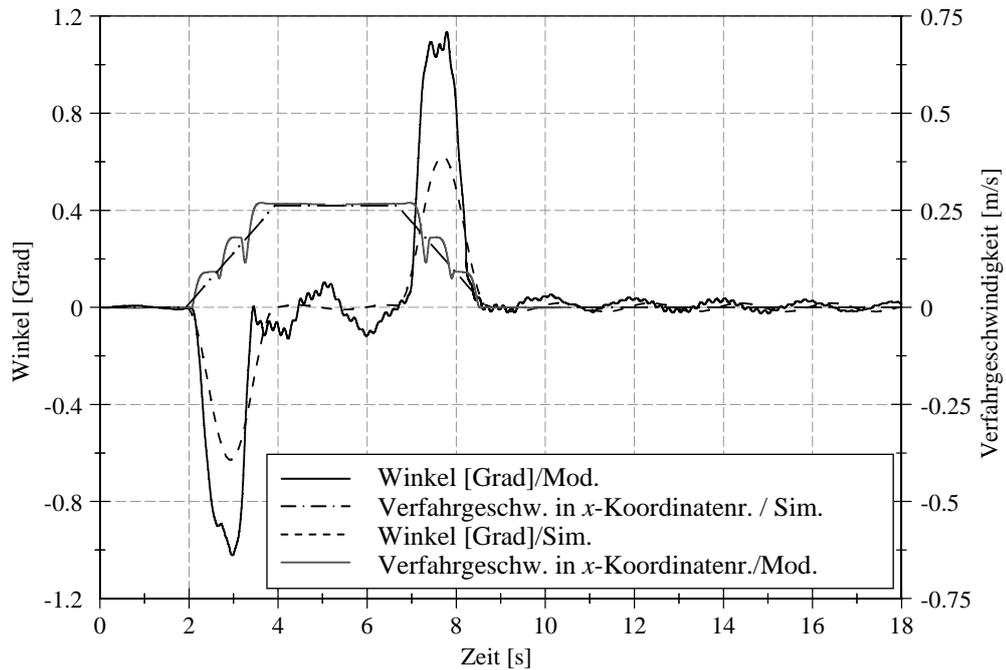
Abb. A.23 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5



| | | | |
|-----------------------------|-------------|--|--|
| Tragseillänge l : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Positionierung (Sim./Mod.): | 0,23°/0,17° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 4,48°/4,12° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 5,56°/4,12° | Max. Beschl. LAM (Während der Pos./Nach der Pos.; Mod.): | 0,74 m/s ² /0,50 m/s ² |

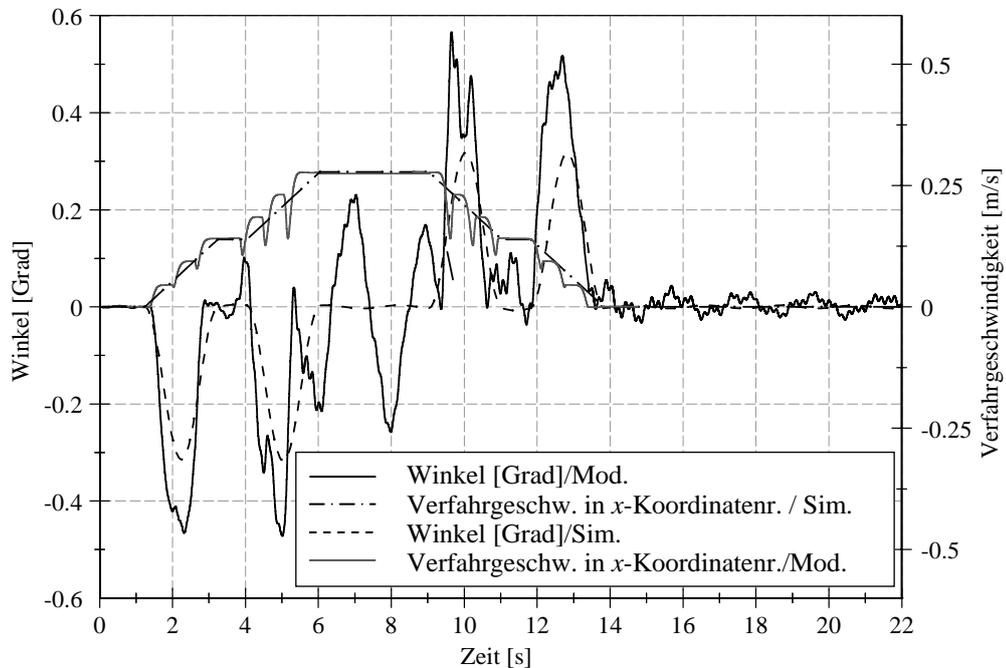
Abb. A.24 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6

Ergebnisse der Modellversuche bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung und einer konstanten Tragseillänge



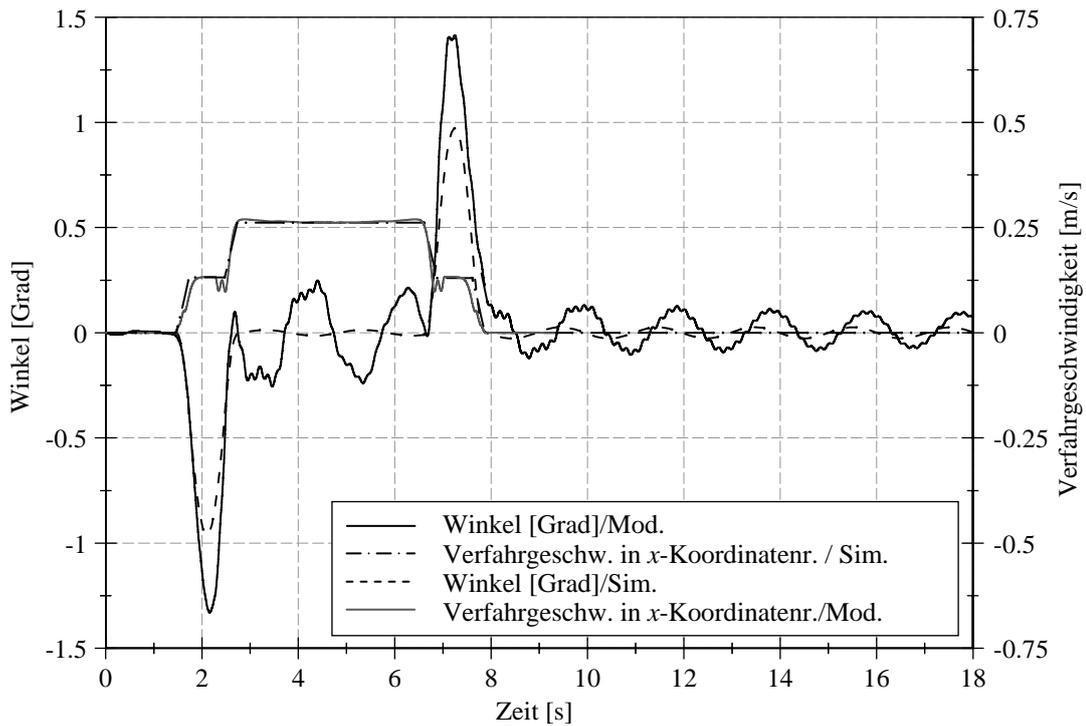
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,02°/0,0375° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,008°/0,116° |
| Max: Winkel | 0,62°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 0,45 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 1,14° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,024 m/s ² |

Abb. A.25 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



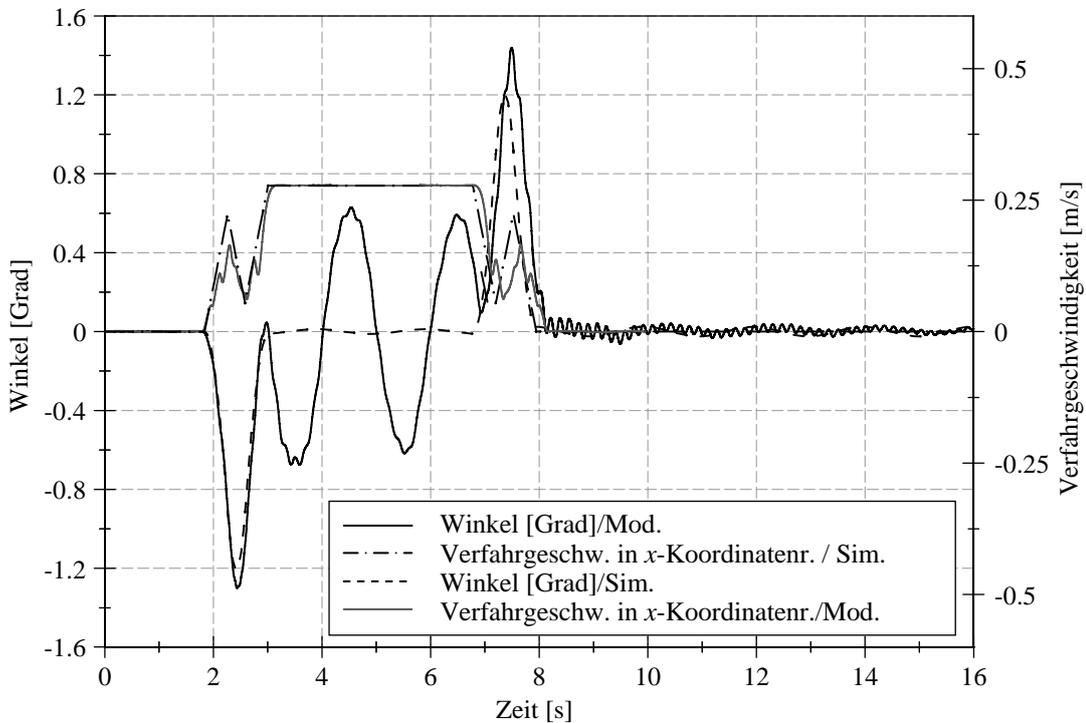
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,003°/0,04° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,003°/0,24° |
| Max: Winkel | 0,32°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 0,27 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 0,52° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,02 m/s ² |

Abb. A.26 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



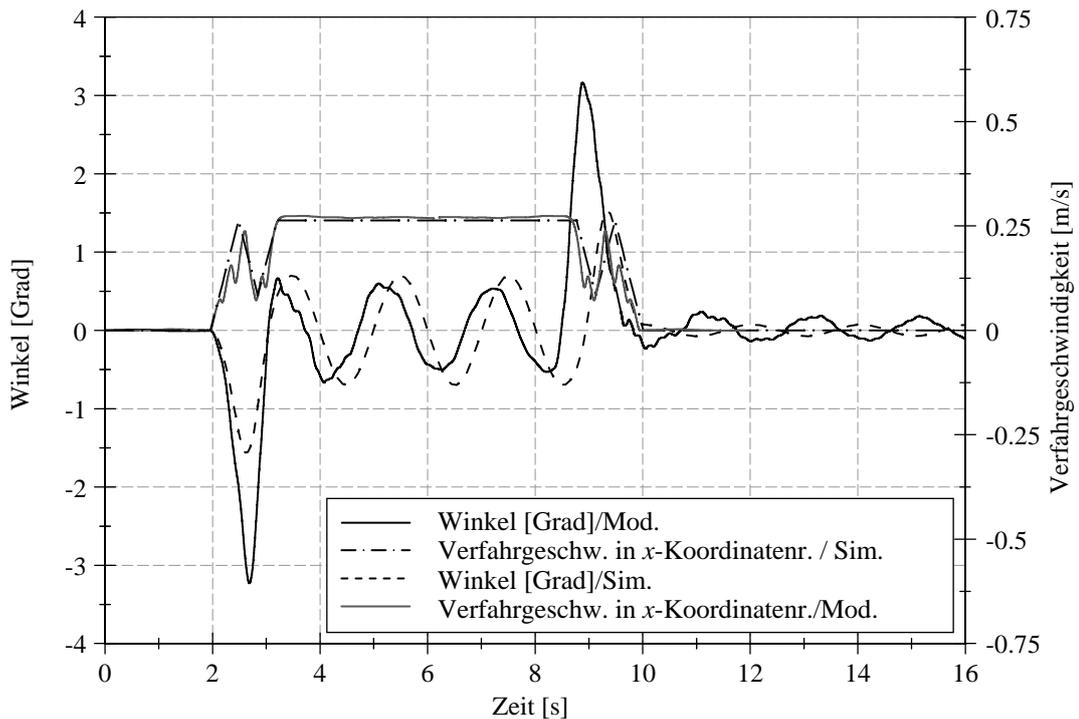
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,03°/0,12° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,01°/0,25° |
| Max: Winkel | 0,97°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 0,55 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 1,37° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,06 m/s ² |

Abb. A.27 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



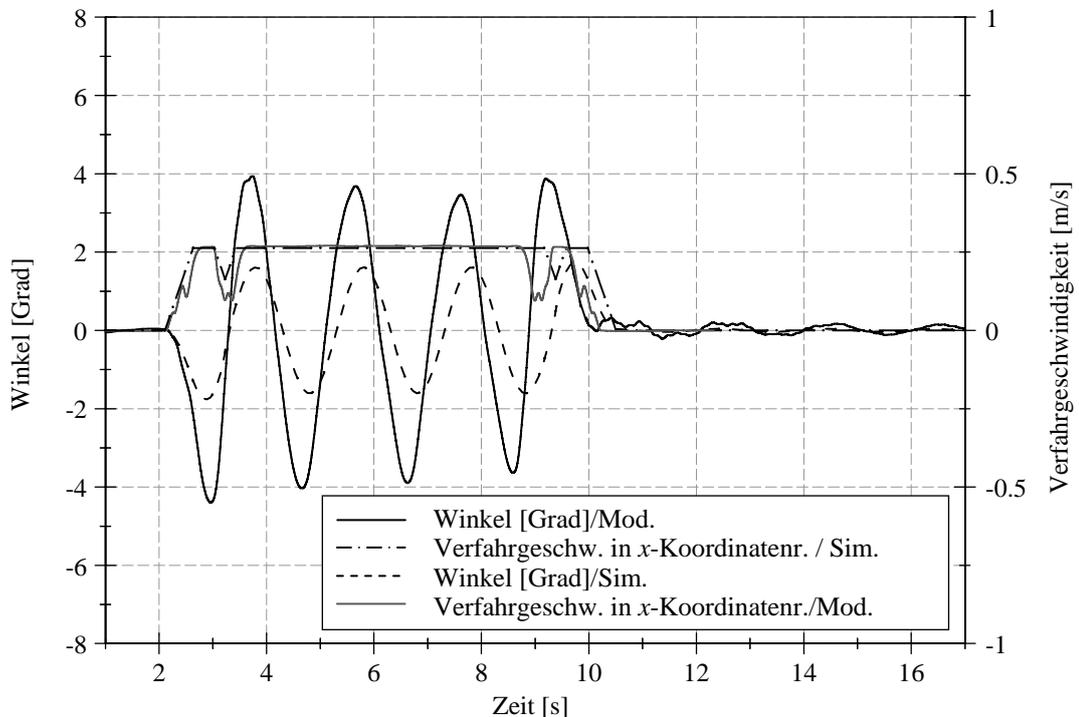
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,02°/0,05° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,01°/0,65° |
| Max: Winkel | 1,20°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 0,58 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 1,37° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,03 m/s ² |

Abb. A.28 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



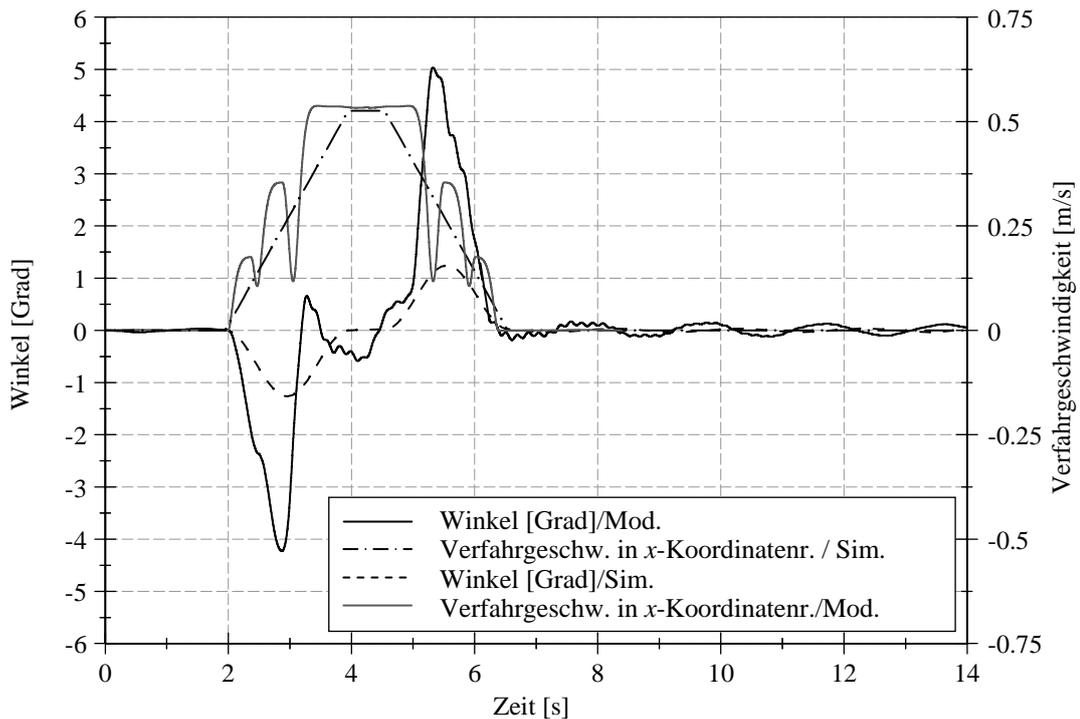
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,07°/0,24° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,70°/0,66° |
| Max: Winkel | 1,52°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 0,87 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 3,20° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,07 m/s ² |

Abb. A.29 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



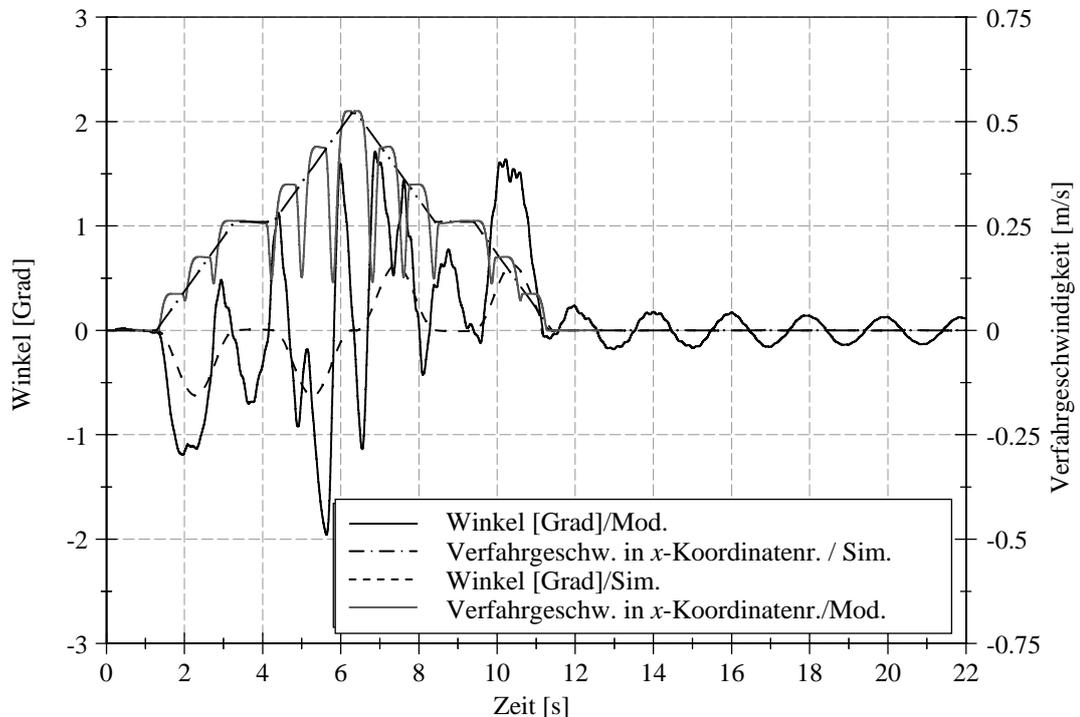
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,04°/0,41° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 1,61°/4,17° |
| Max: Winkel | 1,74°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 1,00 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 4,17° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,08 m/s ² |

Abb. A.30 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



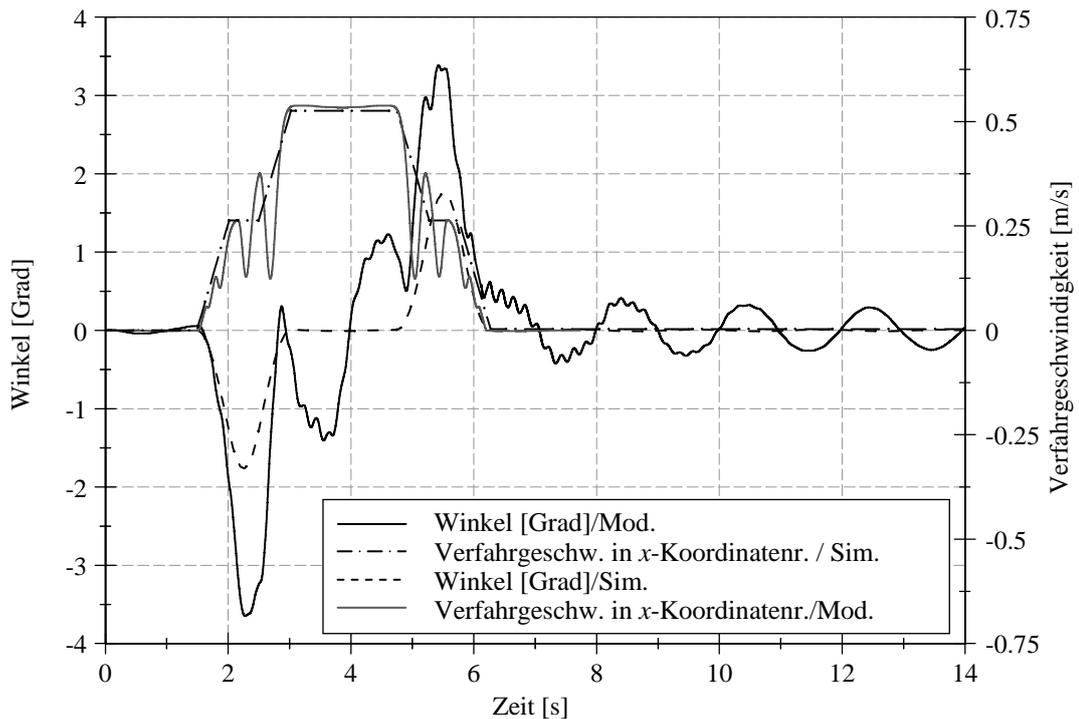
| | | | |
|-----------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,003°/0,14° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,002°/0,62° |
| Max: Winkel | 1,06°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 1,14 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 4,64° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,07 m/s ² |

Abb. A.31 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



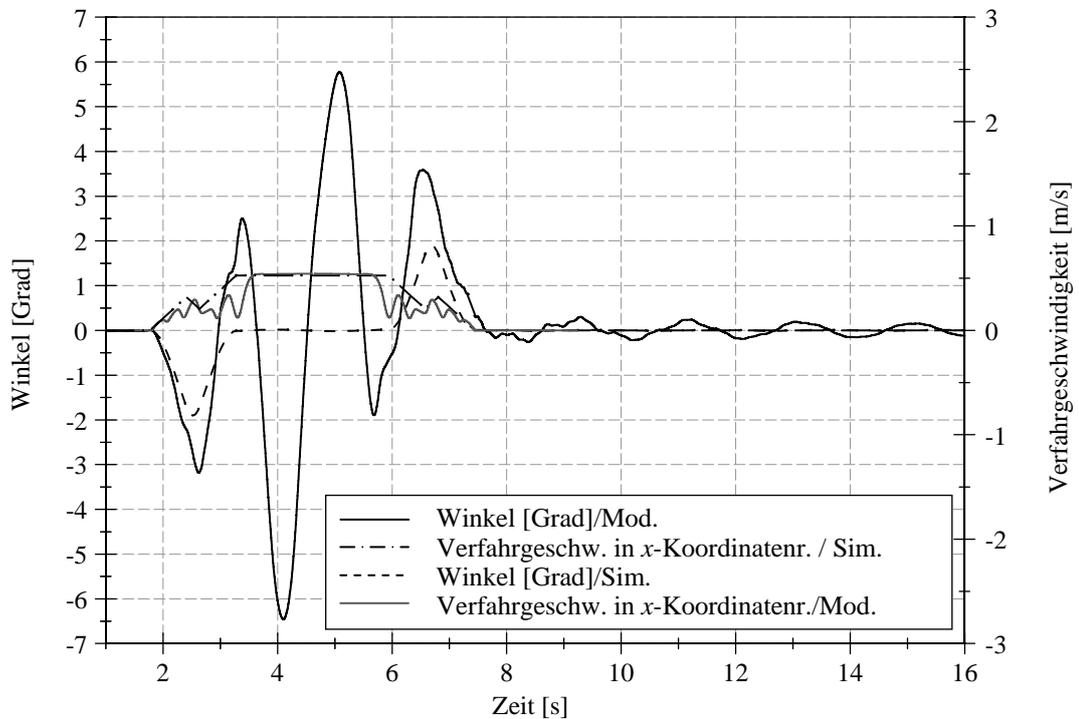
| | | | |
|-----------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,002°/0,21° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,009°/1,37° |
| Max: Winkel | 0,63°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 0,60 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 1,84° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,08 m/s ² |

Abb. A.32 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



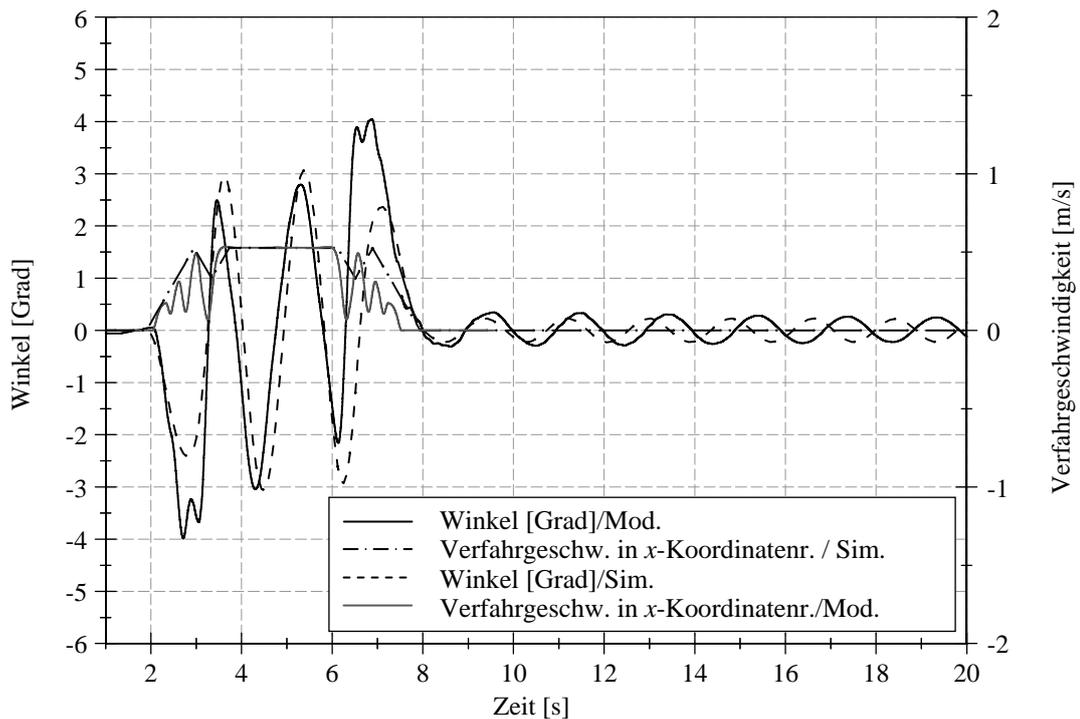
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,01°/0,41° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,008°/1,32° |
| Max: Winkel | 1,77°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 0,41 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 3,52° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,14 m/s ² |

Abb. A.33 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



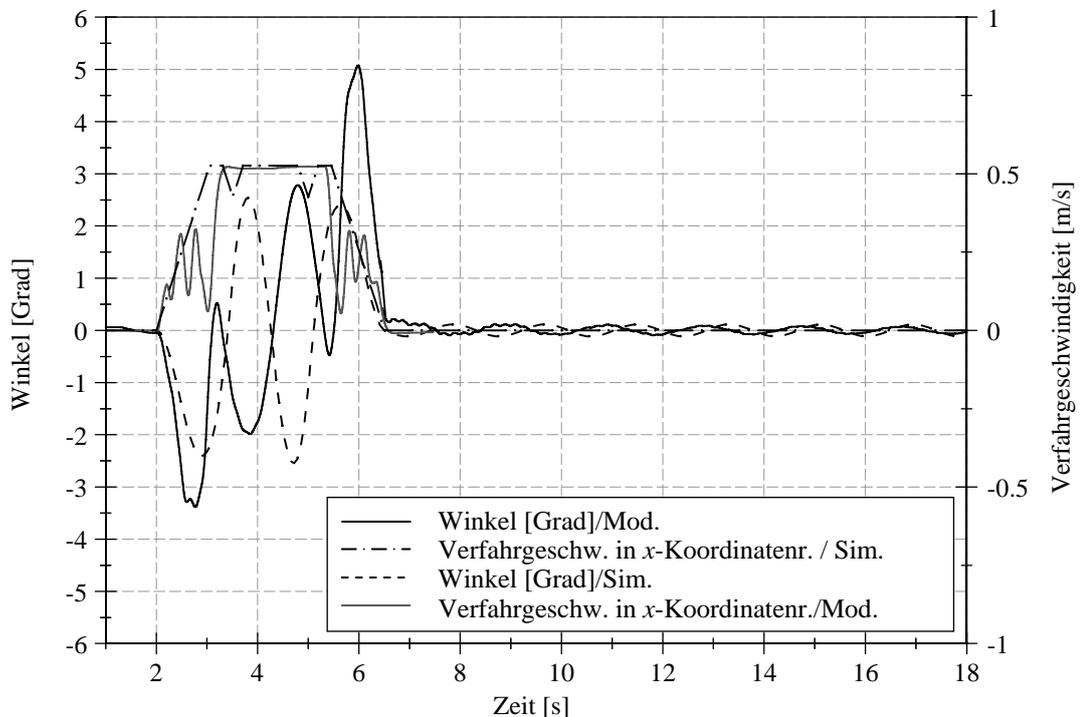
| | | | |
|------------------------------|------------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,01°/0,28° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,018°/6,1° |
| Max: Winkel | 1,91°/6,1° | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 1,51 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,09 m/s ² |

Abb. A.34 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



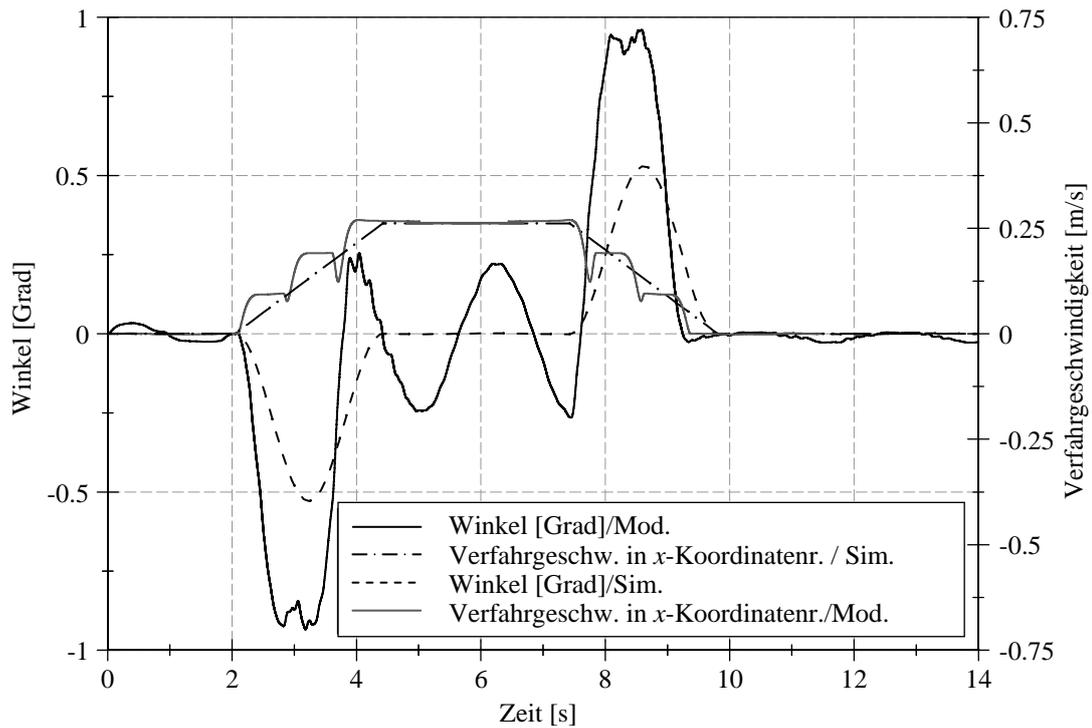
| | | | |
|--------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,22°/0,33° |
| Max. Verfahrensgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 3,06°/2,92° |
| Max: Winkel | 3,06°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 1,10 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 4,03° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,14 m/s ² |

Abb. A.35 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



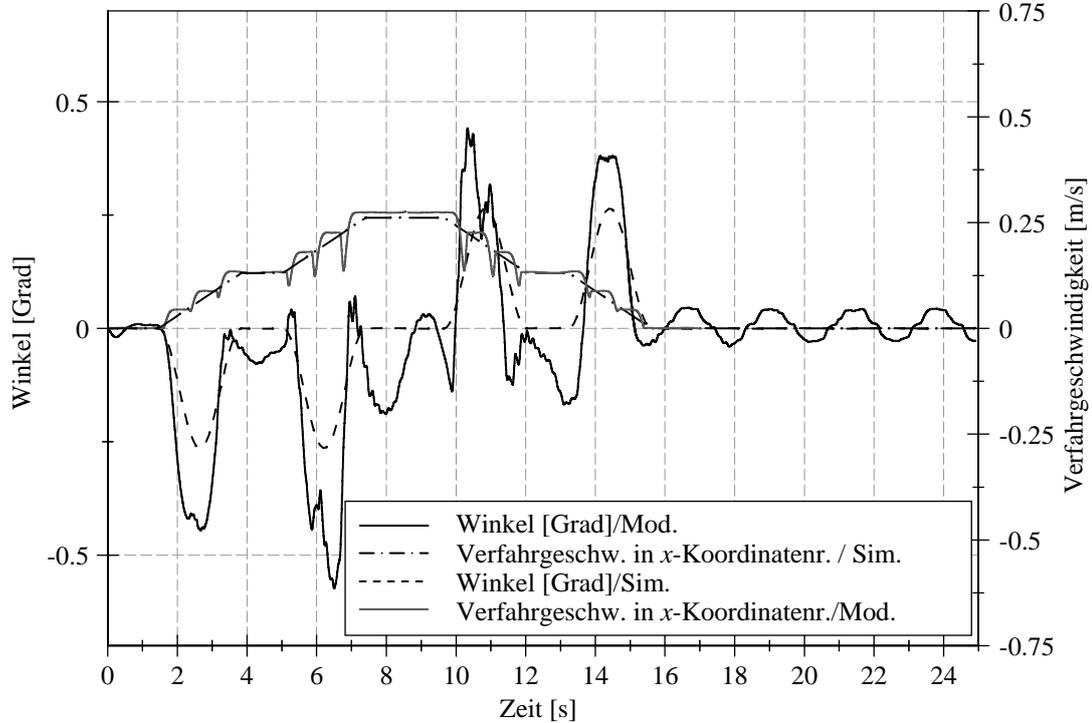
| | | | |
|--------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,11°/0,11° |
| Max. Verfahrensgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 2,56°/2,39° |
| Max: Winkel | 2,56°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 1,12 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 4,23° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,06 m/s ² |

Abb. A.36 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



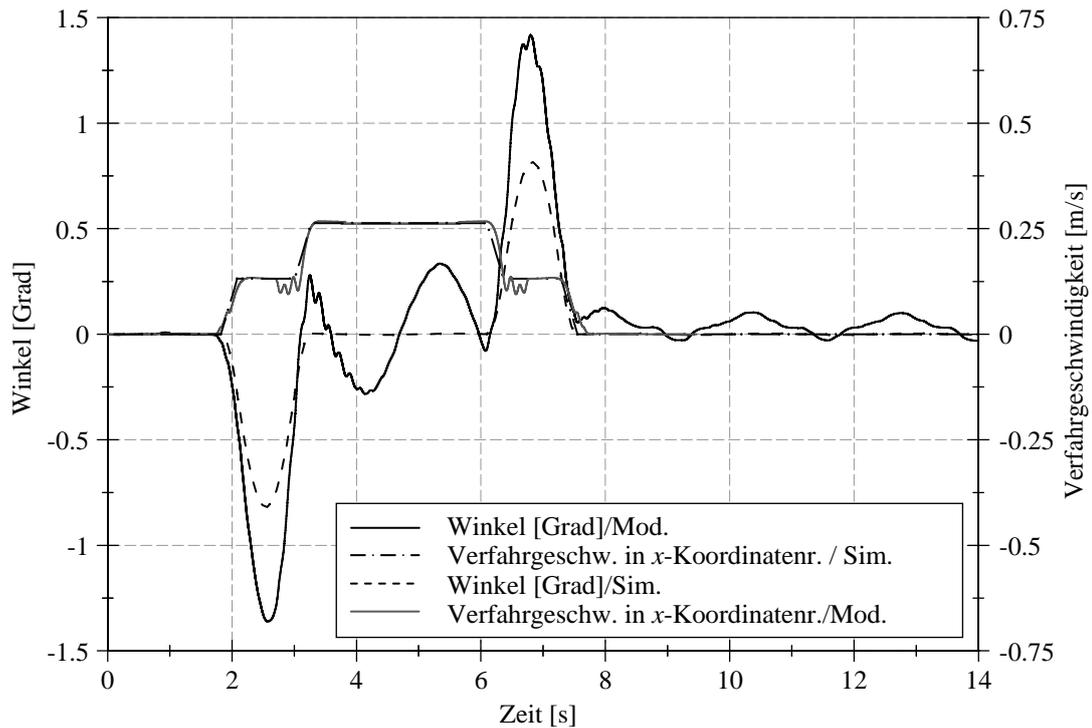
| | | | |
|------------------------------|-------------|---|--|
| LAM Position h : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,001°/0,02° |
| Max. Verfahreneschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,001°/0,26° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 0,53°/0,95° | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. /Nach der Pos.; Mod.): | 0,34 m/s ² /0,02 m/s ² |

Abb. A.36 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



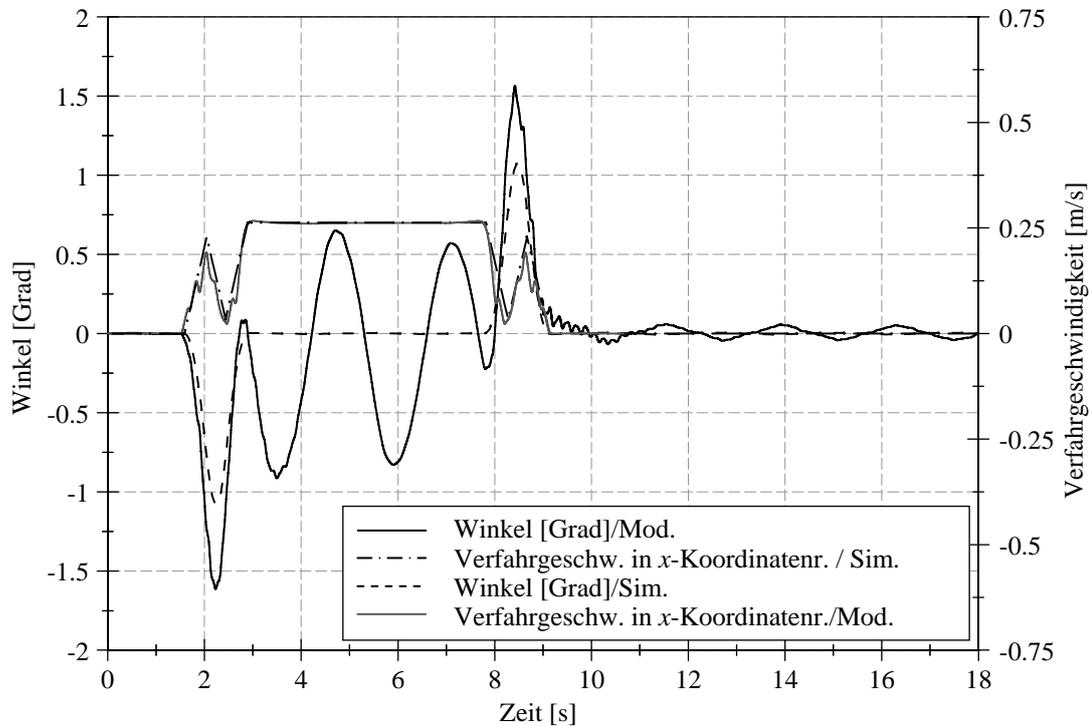
| | | | |
|------------------------------|-------------|---|--|
| LAM Position h : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,005°/0,04° |
| Max. Verfahreneschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,004°/0,11° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 0,26°/0,51° | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. /Nach der Pos.; Mod.): | 0,21 m/s ² /0,03 m/s ² |

Abb. A.37 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



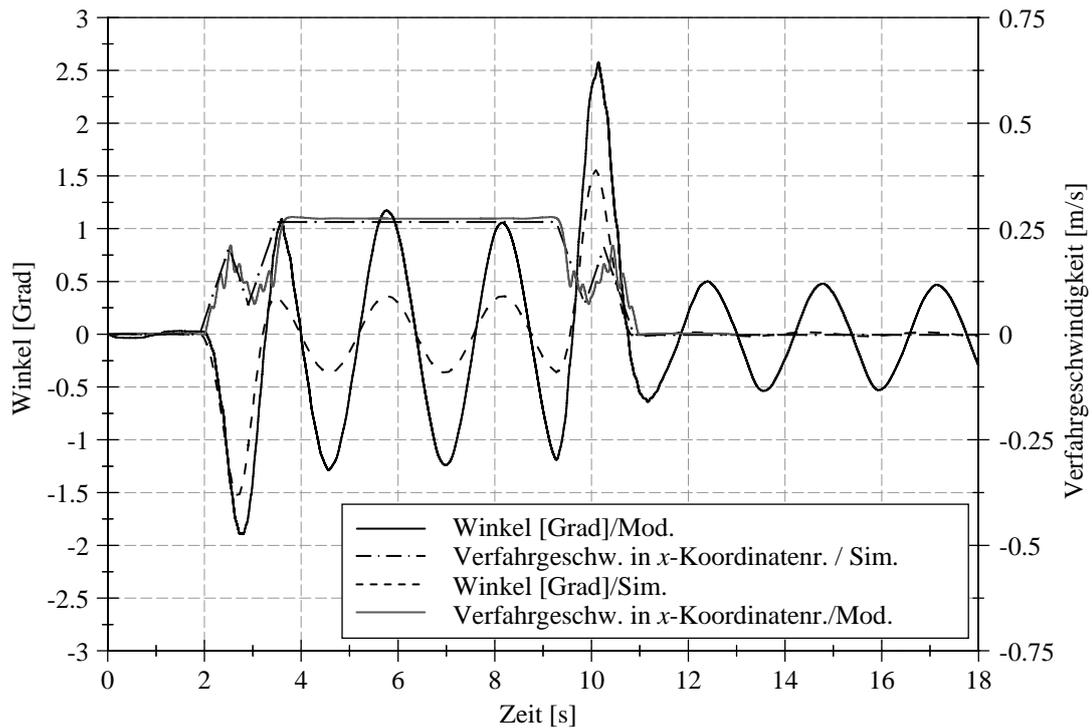
| | | | |
|------------------------------|-------------|---|--|
| LAM Position h : | 1 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,003°/0,076° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,003°/0,31° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 0,82°/1,38° | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. /Nach der Pos.; Mod.): | 0,48 m/s ² /0,05 m/s ² |

Abb. A.38 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



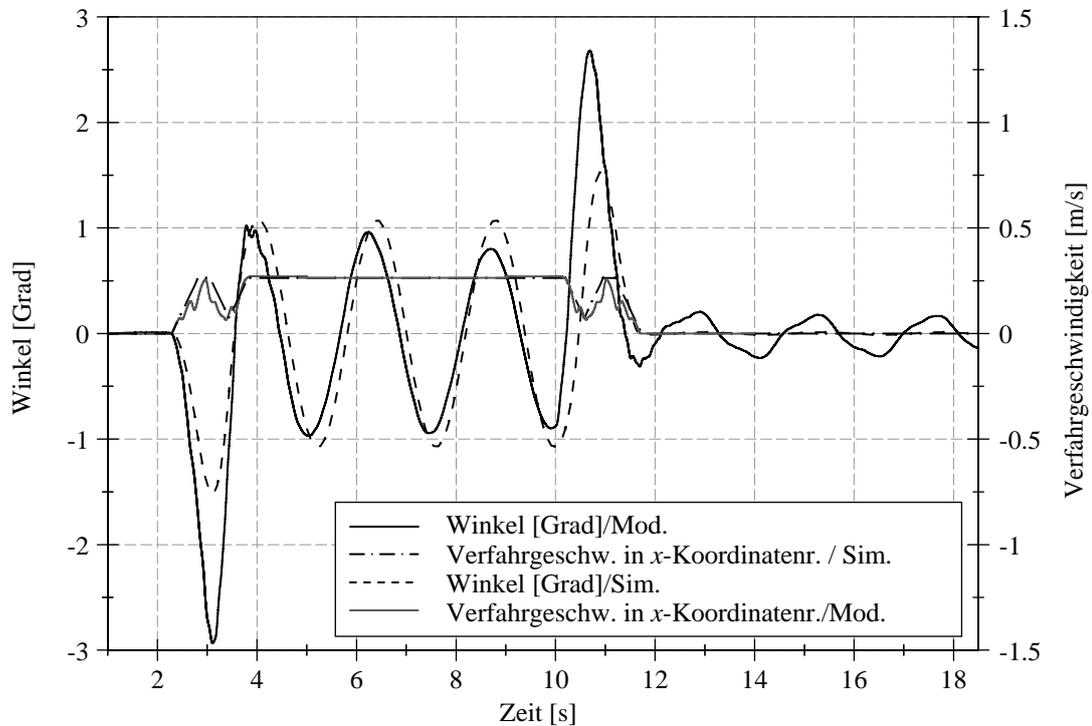
| | | | |
|------------------------------|-------------|---|--|
| LAM Position h : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,004°/0,06° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,002°/0,78° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 1,07°/1,60° | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. /Nach der Pos.; Mod.): | 0,55 m/s ² /0,04 m/s ² |

Abb. A.39 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



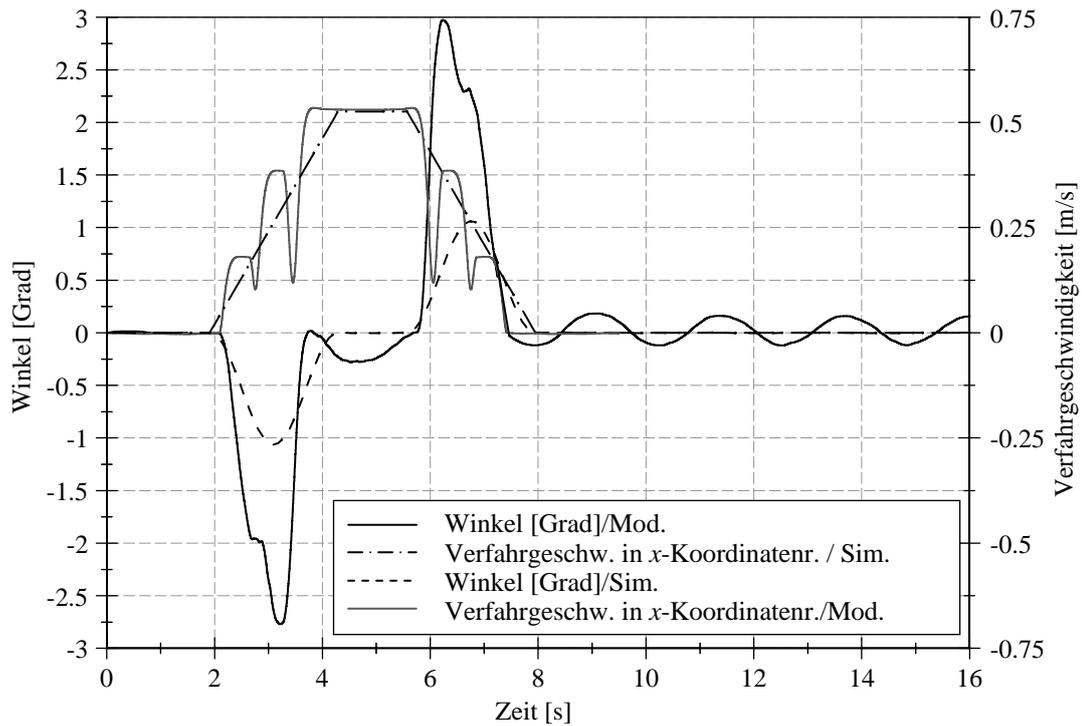
| | | | |
|------------------------------|-------------|---|--|
| LAM Position h : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,02°/0,57° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,36°/1,14° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 1,56°/2,23° | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. /Nach der Pos.; Mod.): | 0,71 m/s ² /0,20 m/s ² |

Abb. A.40 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



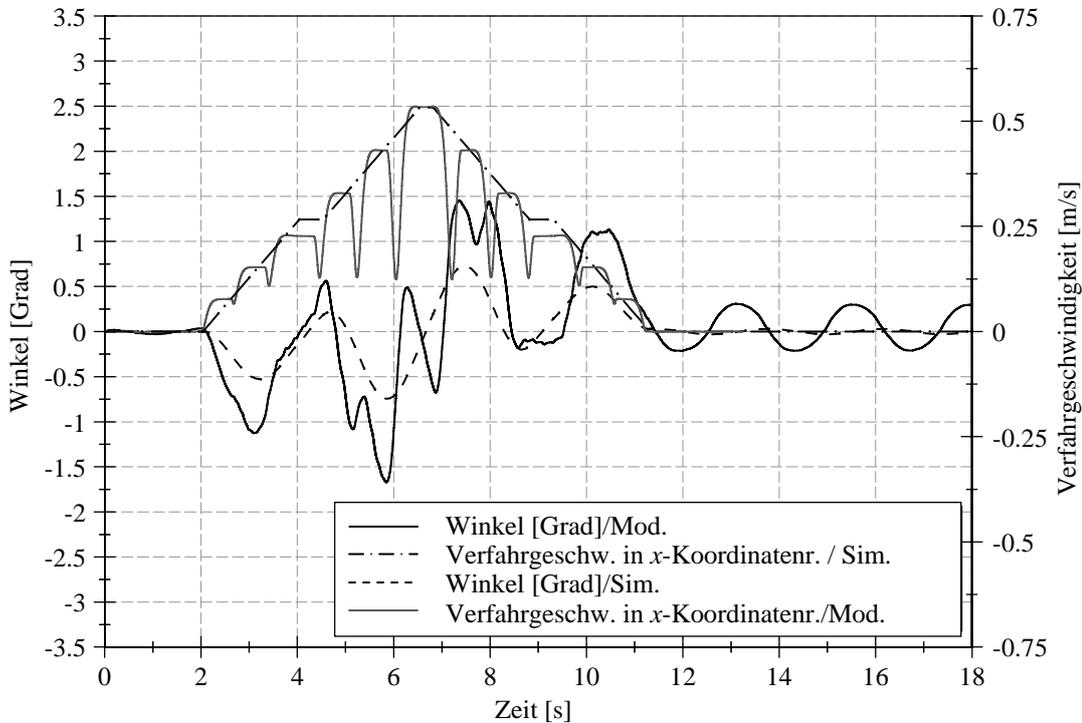
| | | | |
|------------------------------|-------------|---|--|
| LAM Position h : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,01°/0,43° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 1,07°/5,08° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 1,52°/2,54° | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. /Nach der Pos.; Mod.): | 1,39 m/s ² /0,16 m/s ² |

Abb. A.41 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



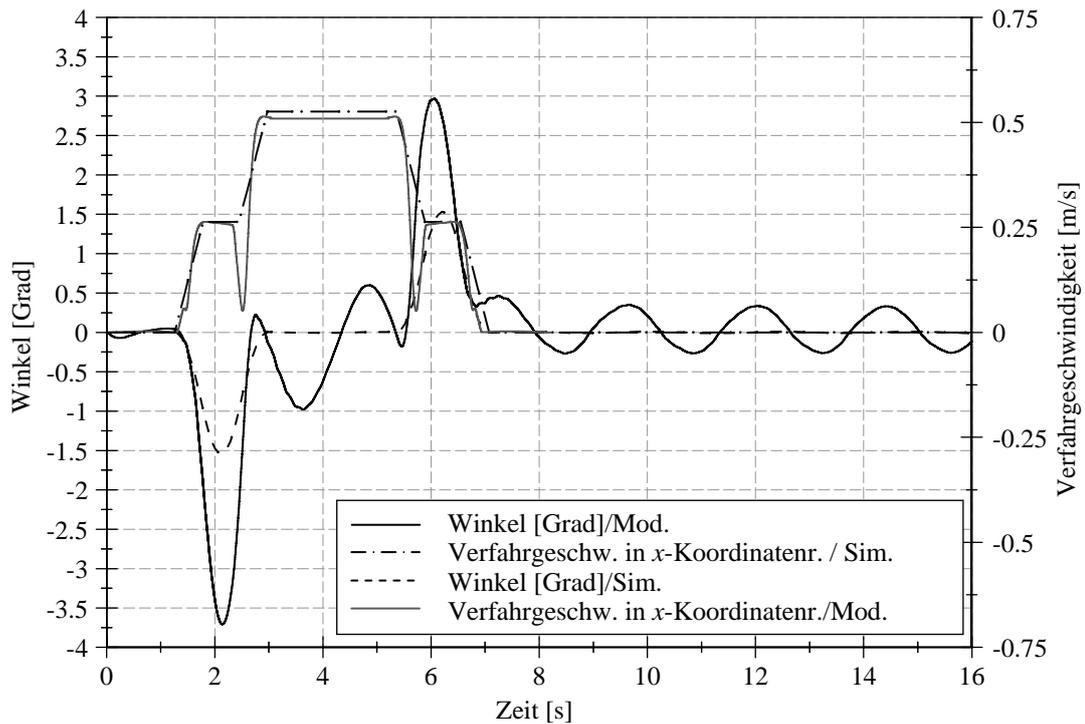
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,003°/0,15° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,002°/0,28° |
| Max: Winkel | 1,06°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 0,84 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 2,87° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,07 m/s ² |

Abb. A.42 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



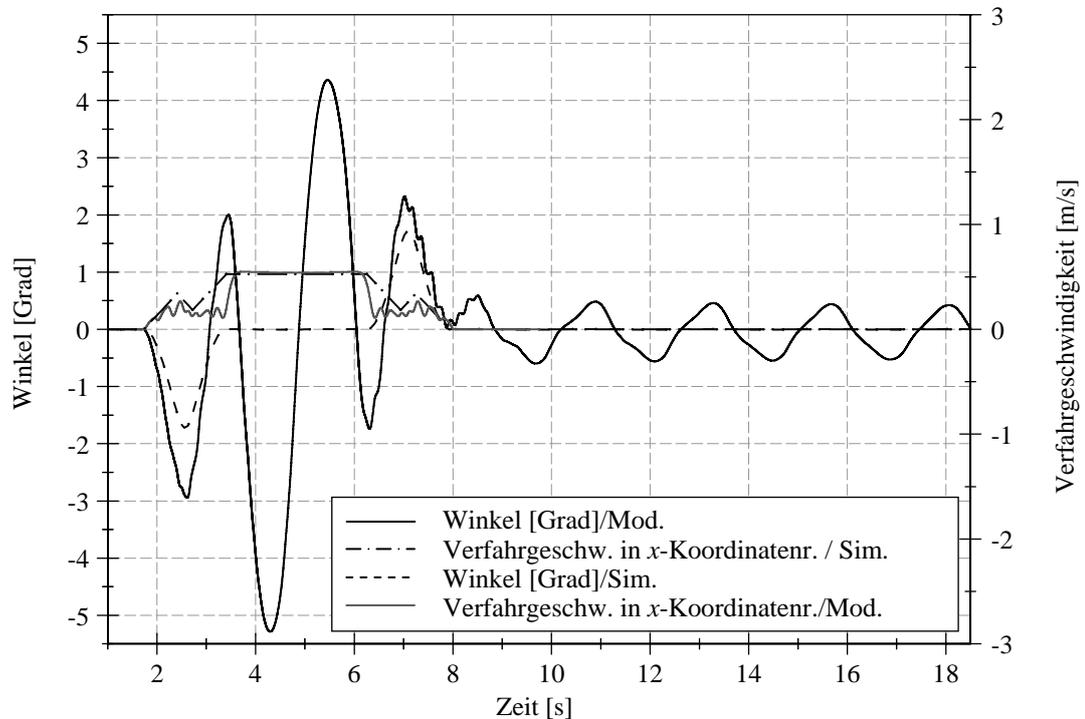
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,03°/0,26° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,72°/1,56° |
| Max: Winkel | 0,72°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 0,52 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 1,56° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,11 m/s ² |

Abb. A.43 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



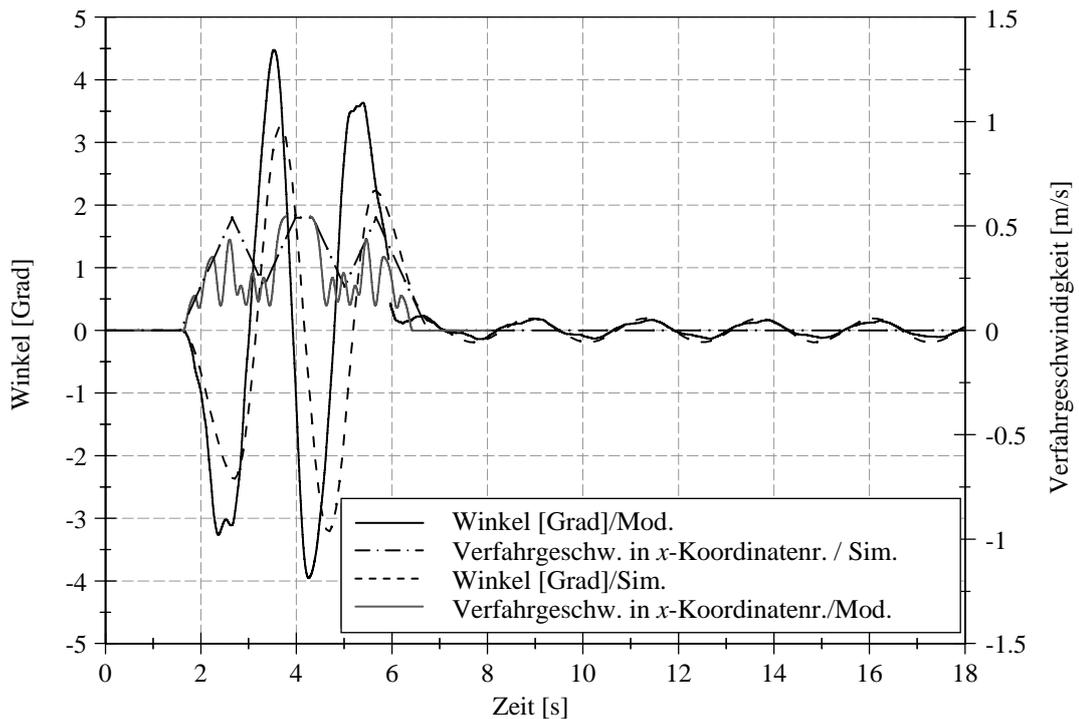
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,009°/0,31° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,006°/0,79° |
| Max: Winkel | 1,54°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 0,93 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 3,33° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,12 m/s ² |

Abb. A.44 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



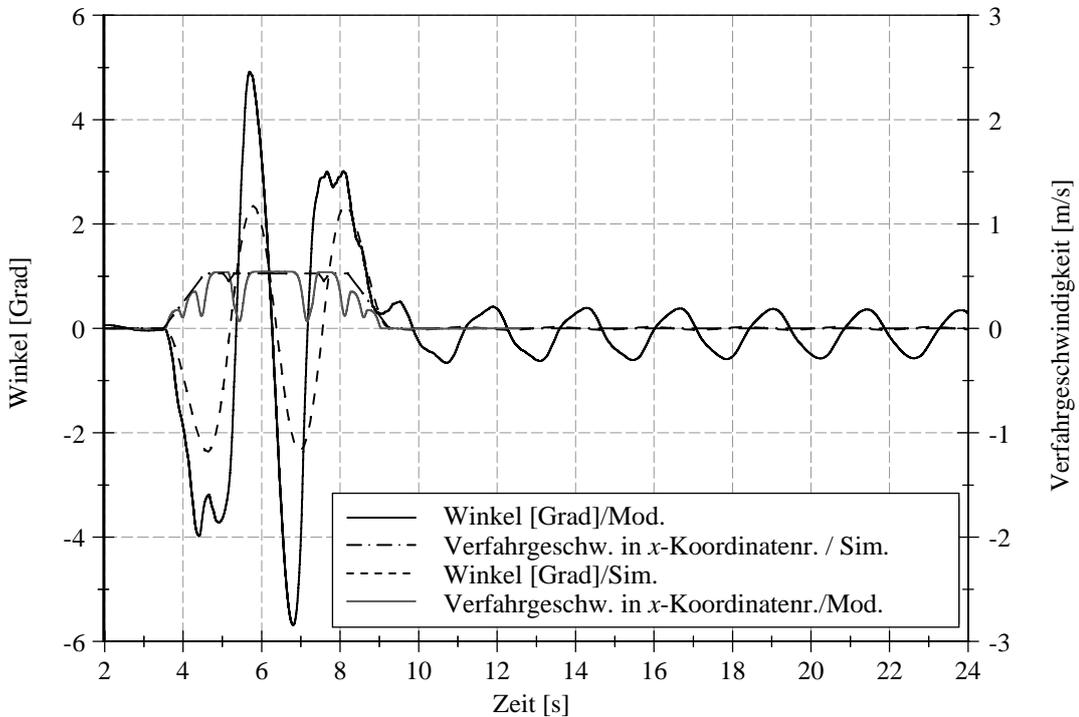
| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------------------|
| LAM Position h : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,004°/0,54° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,005°/4,81° |
| Max: Winkel | 1,73°/ | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. | 1,27 m/s ² / |
| (Sim./Modell): | 4,81° | /Nach der Pos.; Mod.): | 0,14 m/s ² |

Abb. A.45 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



| | | | |
|------------------------------|-------------|---|--|
| LAM Position h : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,18°/0,16° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 3,25°/4,21° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 3,25°/4,21° | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. /Nach der Pos.; Mod.): | 1,31 m/s ² /0,07 m/s ² |

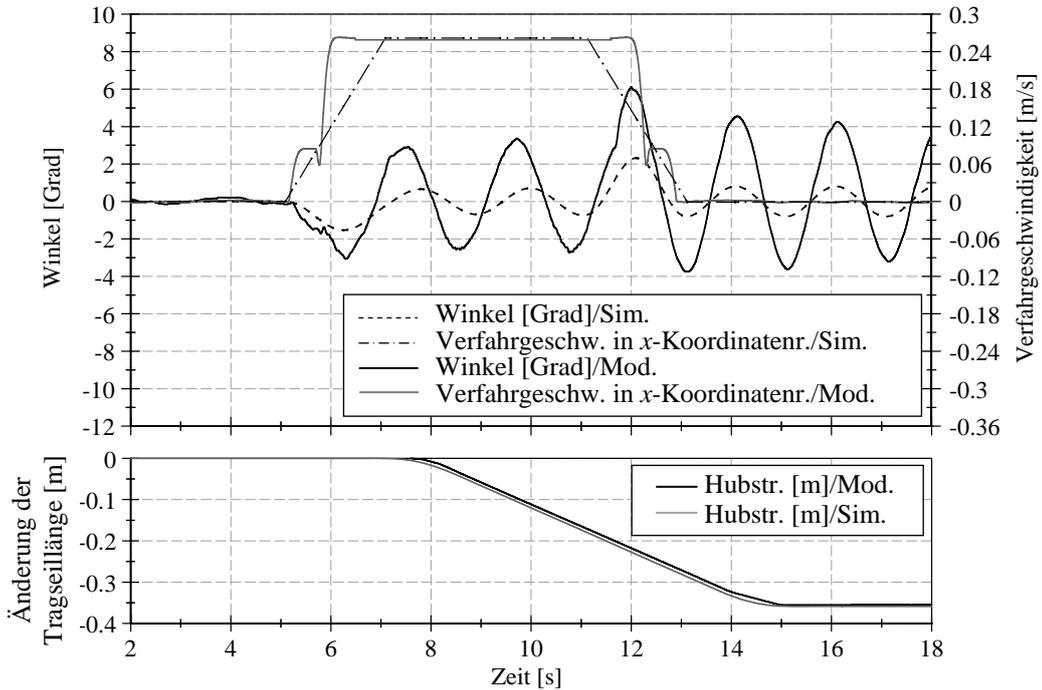
Abb. A.46 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)



| | | | |
|------------------------------|-------------|---|--|
| LAM Position h : | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos. (Sim./Mod.): | 0,02°/0,54° |
| Max. Verfahrsgeschw. v_K : | 526 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 2,37°/5,29° |
| Max: Winkel (Sim./Modell): | 2,37°/5,29° | Max. Beschl. LAM im Modell (Während der Pos. /Nach der Pos.; Mod.): | 1,40 m/s ² /0,14 m/s ² |

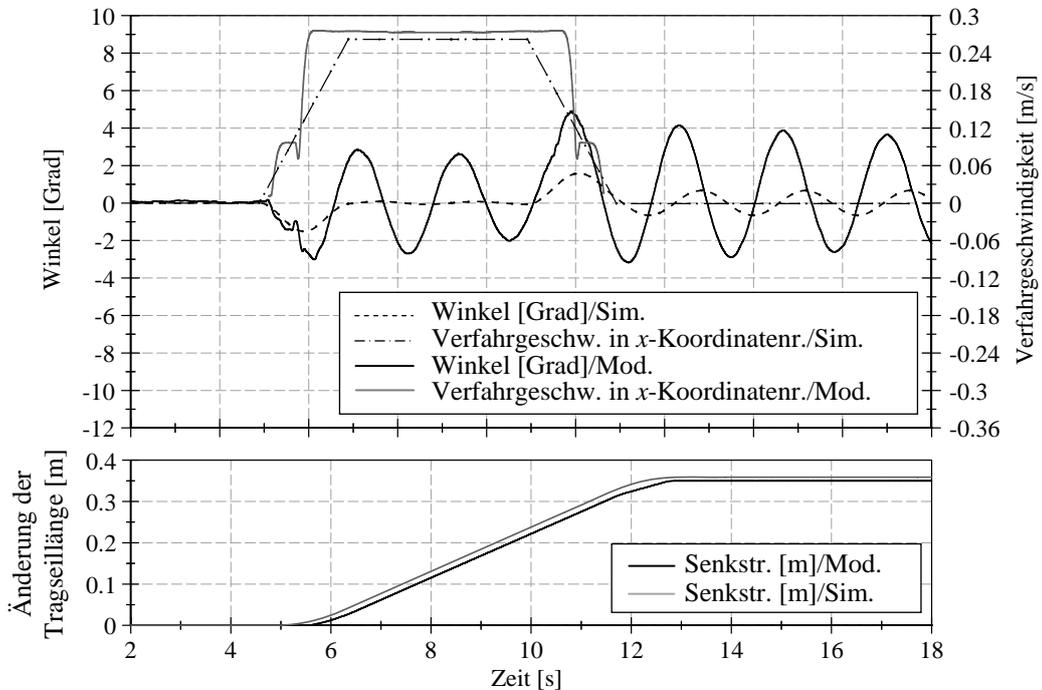
Abb. A.47 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6 (Tragseilabstand $d = 480$ mm)

Ergebnisse der Modellversuche bei einer paralleler Trageilanzordnung und einer veränderlichen Trageillänge während des Verfahrens



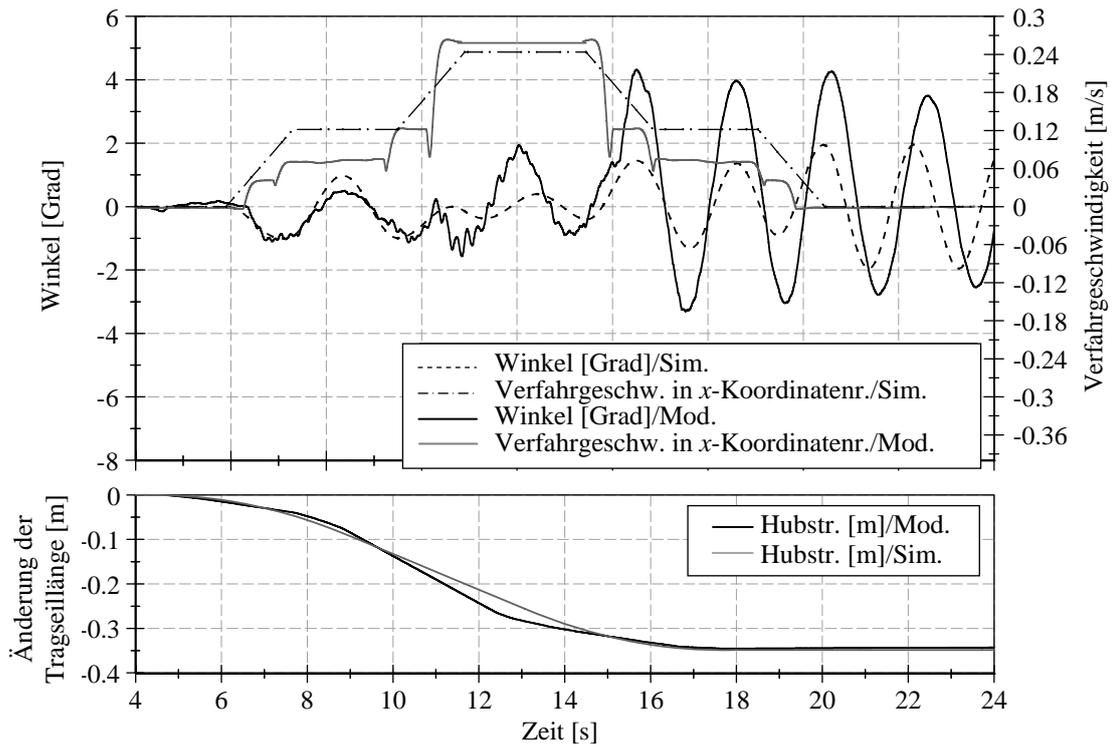
| | | | |
|-------------------------------|----------|--|---------------|
| Trageill. l zu Beginn/Ende: | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 0,815°/ 4,08° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 2,3°/6,11° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 6,11°/2,3° |

Abb. A.48 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1 und dem Heben der Last
 *Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden



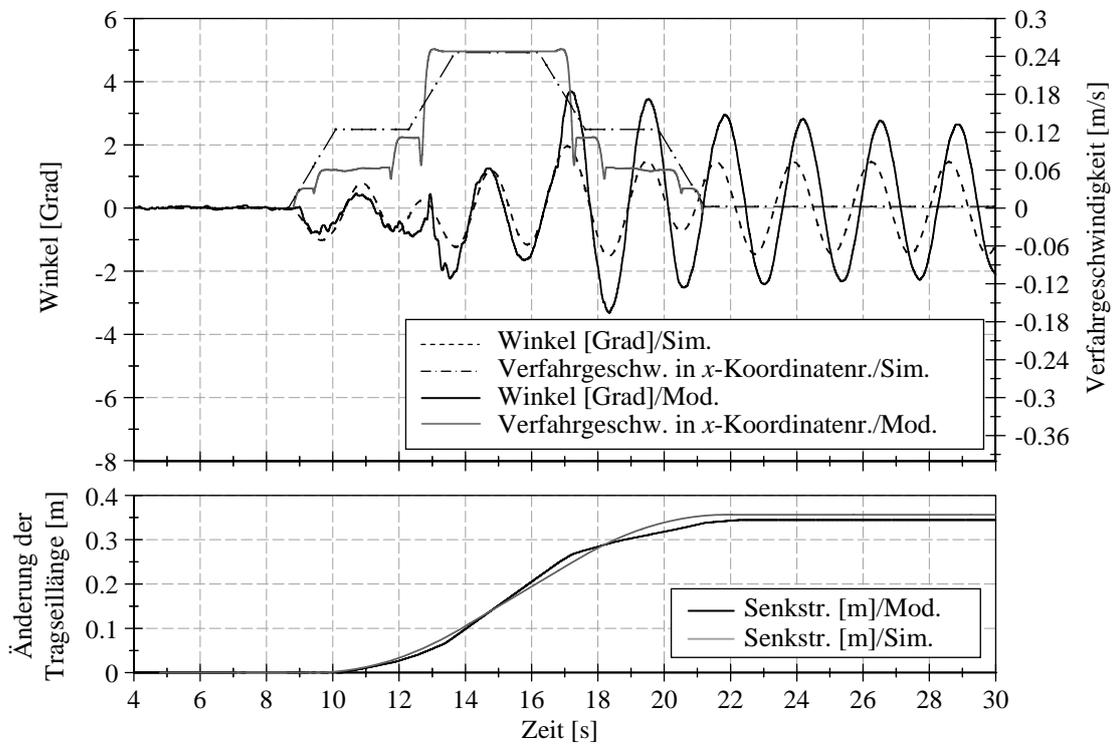
| | | | |
|-------------------------------|----------|--|-------------|
| Trageill. l zu Beginn/Ende: | 1 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 0,66°/3,52° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 1,58°/4,91° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 1,58°/4,91° |

Abb. A.49 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1 und dem Senken der Last



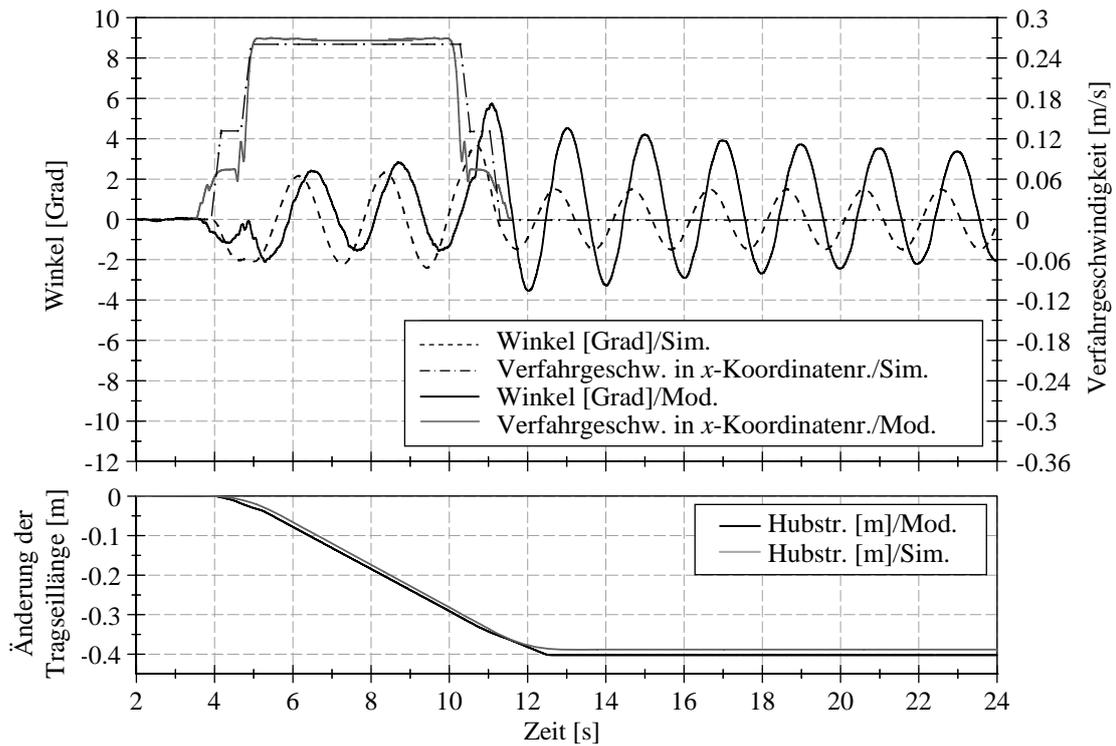
| | | | |
|--------------------------------|----------|--|-------------|
| Tragseill. l zu Beginn/Ende: | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 1,46°/3,17° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 1,46°/4,32° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 1,46°/4,32° |

Abb. A.50 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2 und dem Heben der Last
 *Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden



| | | | |
|--------------------------------|----------|--|-------------|
| Tragseill. l zu Beginn/Ende: | 1 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 1,46°/2,61° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 1,96°/3,71° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 1,96°/3,71° |

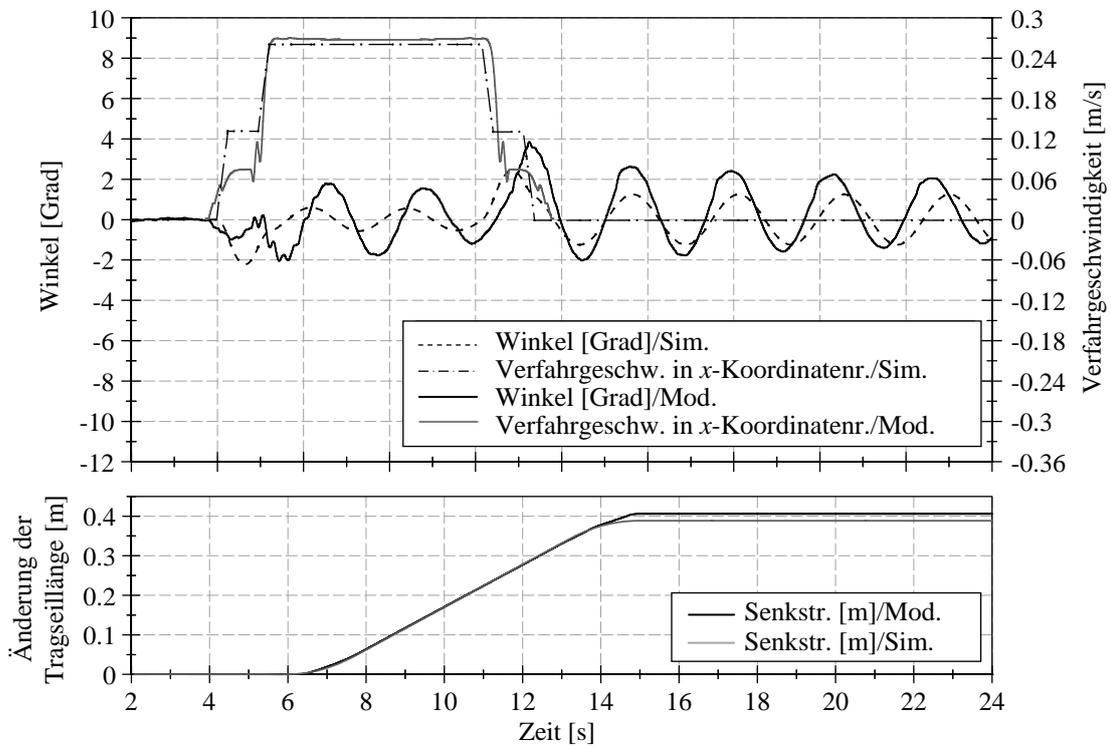
Abb. A.51 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2 und dem Senken der Last



| | | | |
|-------------------------------|----------|--|------------|
| Tragseil. l zu Beginn/Ende: | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 1,5°/4,07° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 3,7°/5,75° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 3,7°/5,75° |

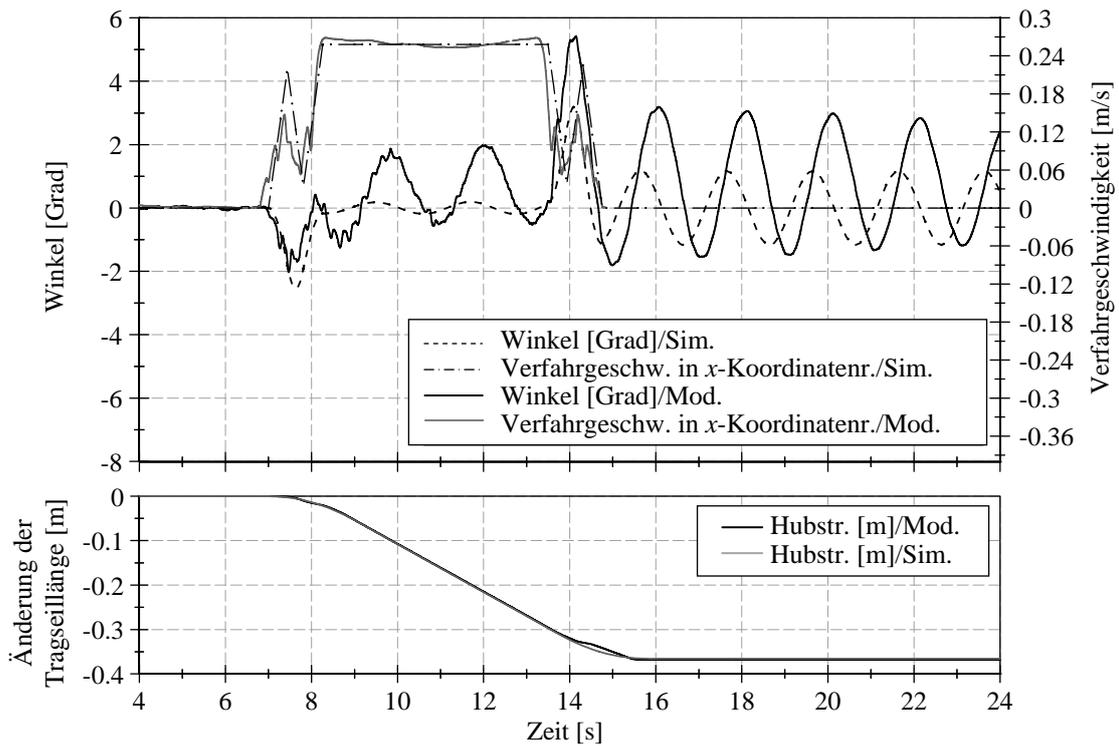
Abb. A.52 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3 und dem Heben der Last

**Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden*



| | | | |
|-------------------------------|----------|--|-------------|
| Tragseil. l zu Beginn/Ende: | 1 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 1,25°/2,34° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 2,44°/3,85° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 2,44°/3,85° |

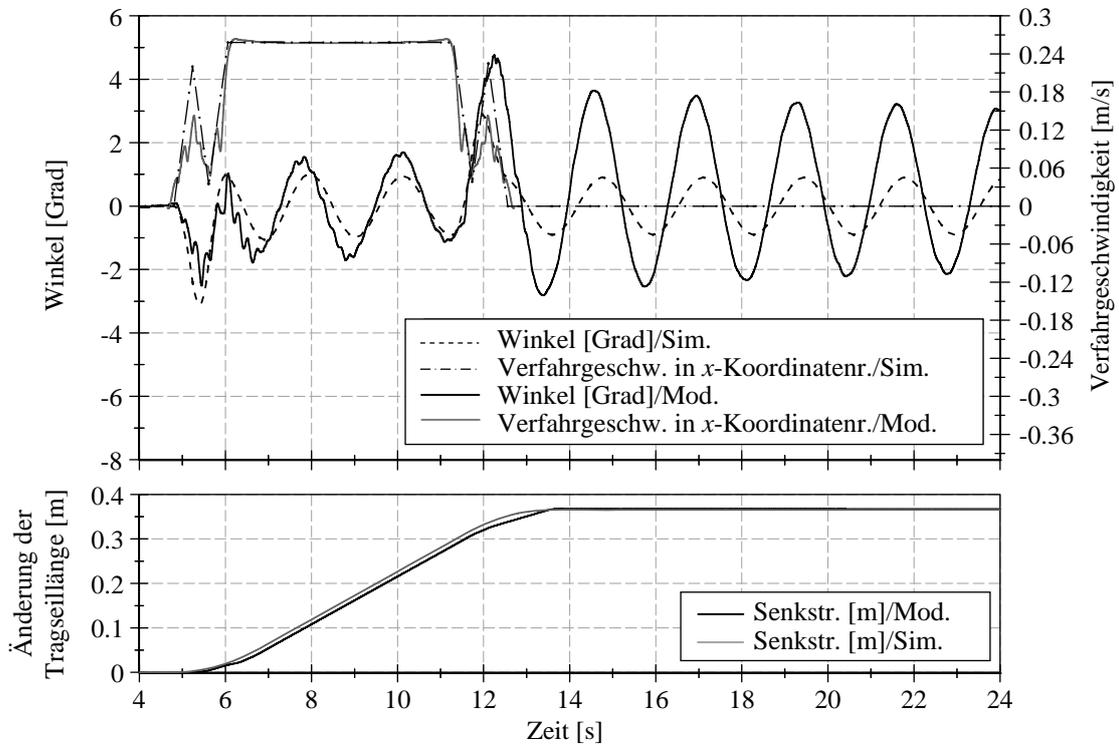
Abb. A.53 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3 und dem Senken der Last



| | | | |
|--------------------------------|----------|--|-------------|
| Tragseill. l zu Beginn/Ende: | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 1,17°/2,41° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 3,19°/5,42° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 3,19°/5,42° |

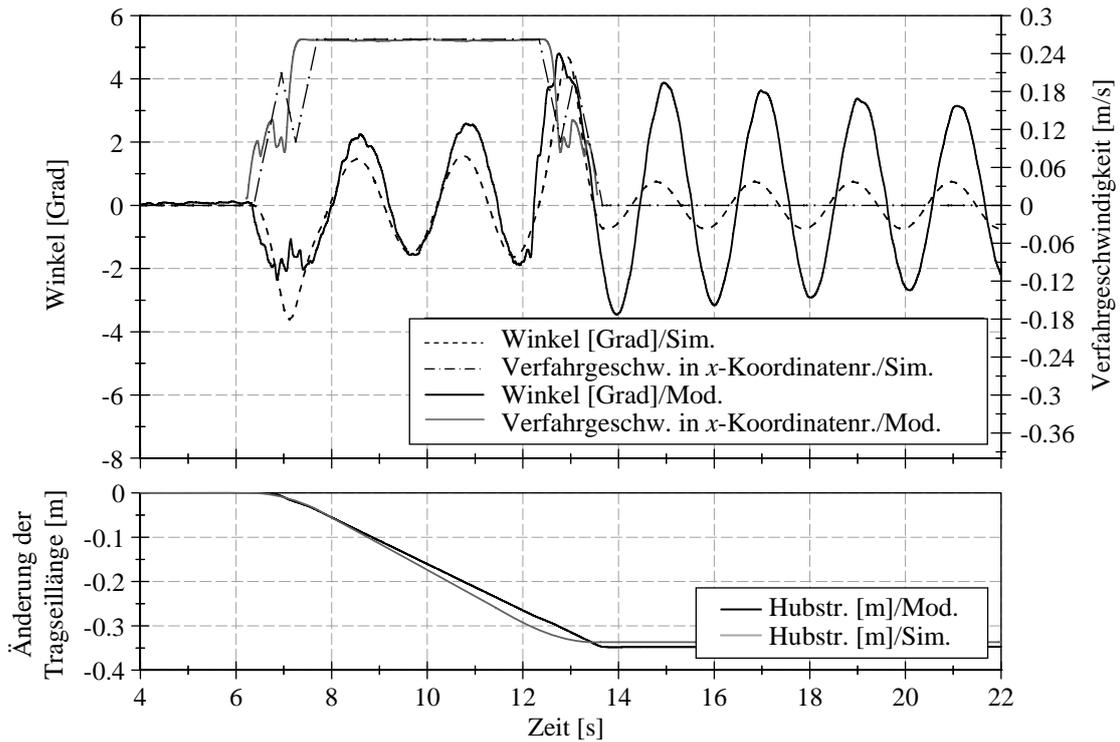
Abb. A.54 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4 und dem Heben der Last

**Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden*



| | | | |
|--------------------------------|----------|--|--------------|
| Tragseill. l zu Beginn/Ende: | 1 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 0,905°/3,23° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 2,89°/4,77° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 2,89°/4,77° |

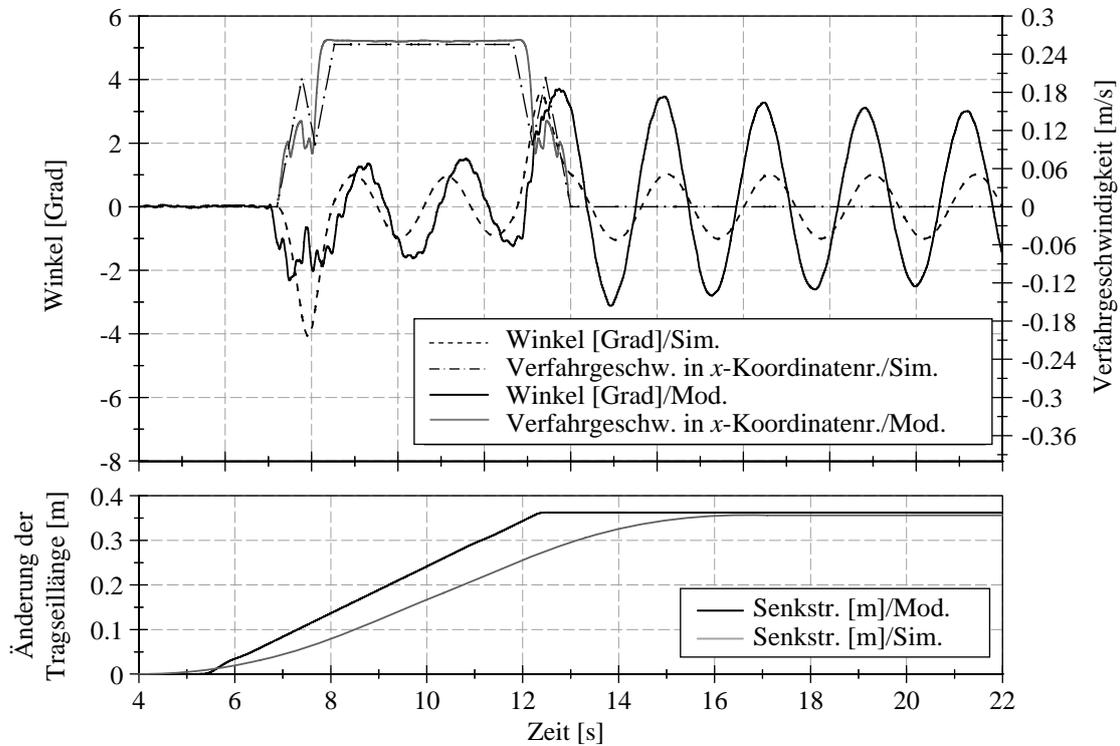
Abb. A.55 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4 und dem Senken der Last



| | | | |
|--------------------------------|----------|--|-------------|
| Tragseill. l zu Beginn/Ende: | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 0,75°/2,82° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 4,71°/4,32° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 4,71°/4,32° |

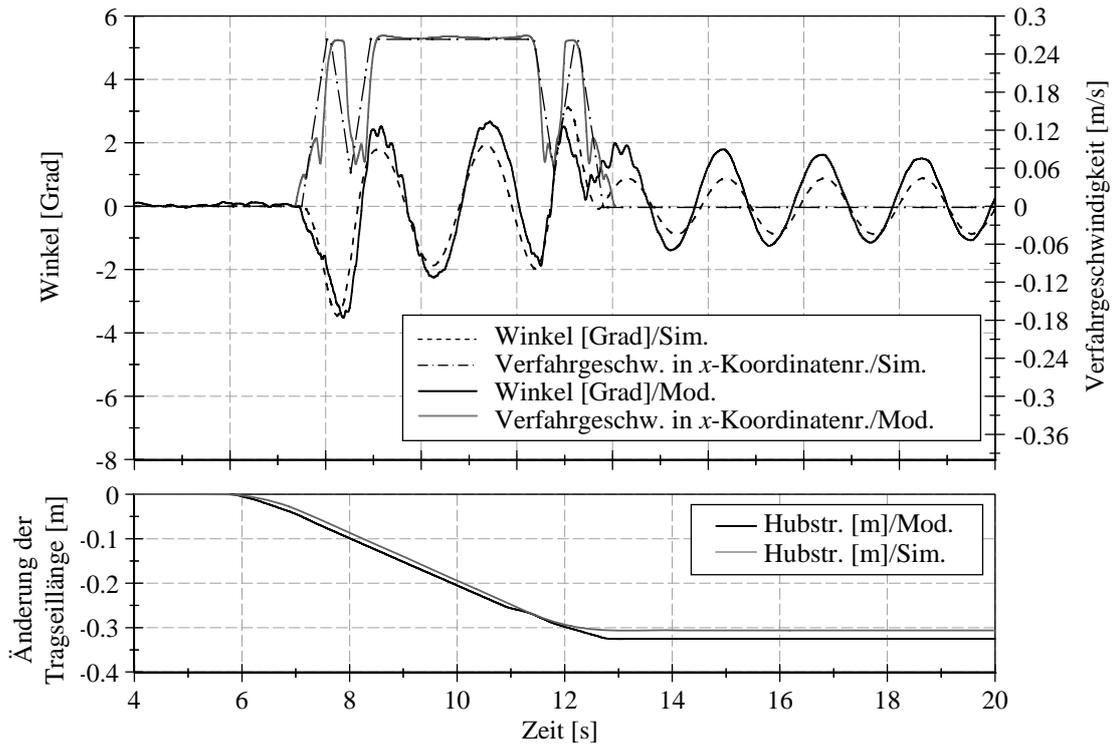
Abb. A.56 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5 und dem Heben der Last

**Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden*



| | | | |
|--------------------------------|----------|--|-------------|
| Tragseill. l zu Beginn/Ende: | 1 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 0,81°/2,49° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 3,32°/3,27° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 3,32°/3,27° |

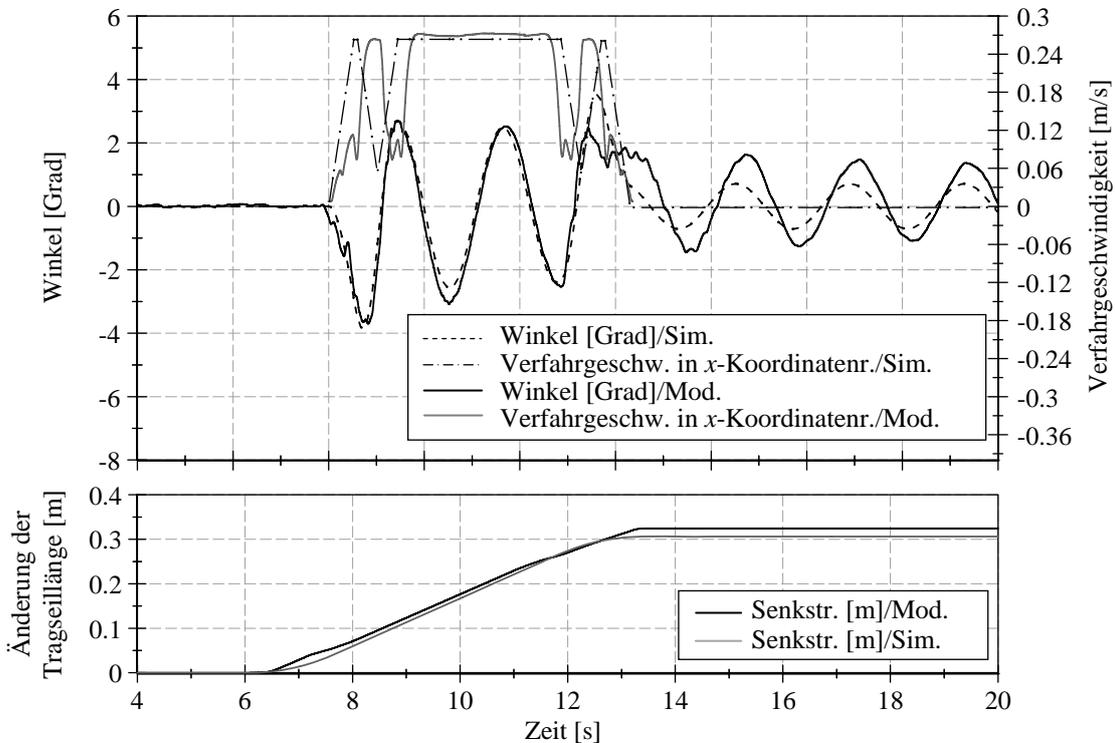
Abb. A.57 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5 und dem Senken der Last



| | | | |
|--------------------------------|----------|--|-------------|
| Tragseill. l zu Beginn/Ende: | 1,5 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 0,88°/1,65° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 3,12°/2,67° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 3,12°/2,67° |

Abb. A.58 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6 und dem Heben der Last

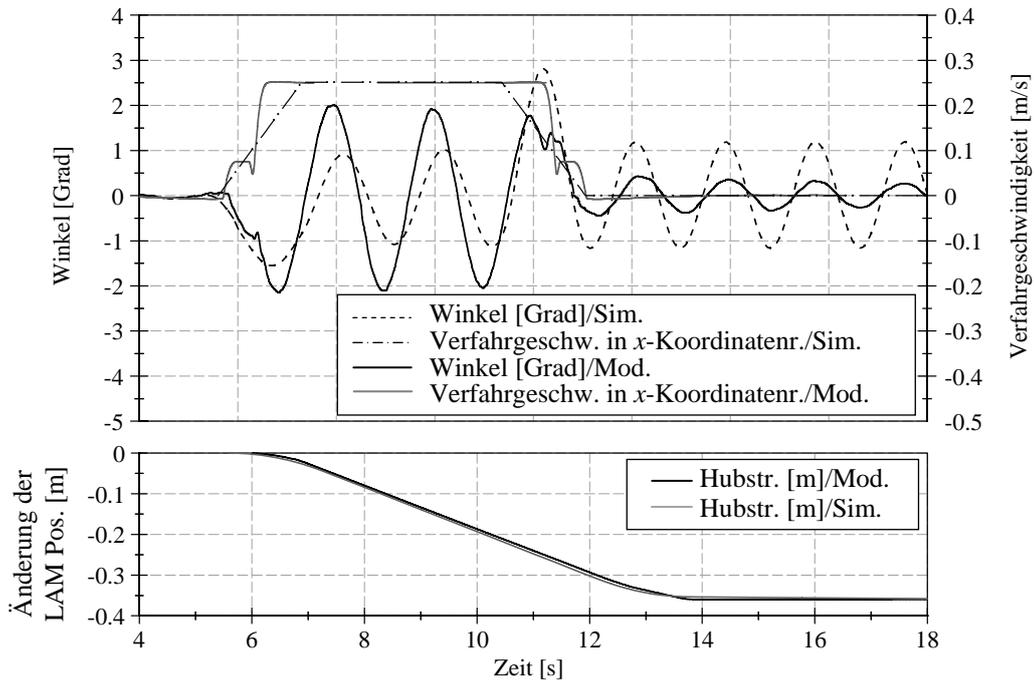
**Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden*



| | | | |
|--------------------------------|----------|--|--------------|
| Tragseill. l zu Beginn/Ende: | 1 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 0,887°/1,65° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 3,53°/2,69° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 3,53°/2,69° |

Abb. A.59 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6 und dem Senken der Last

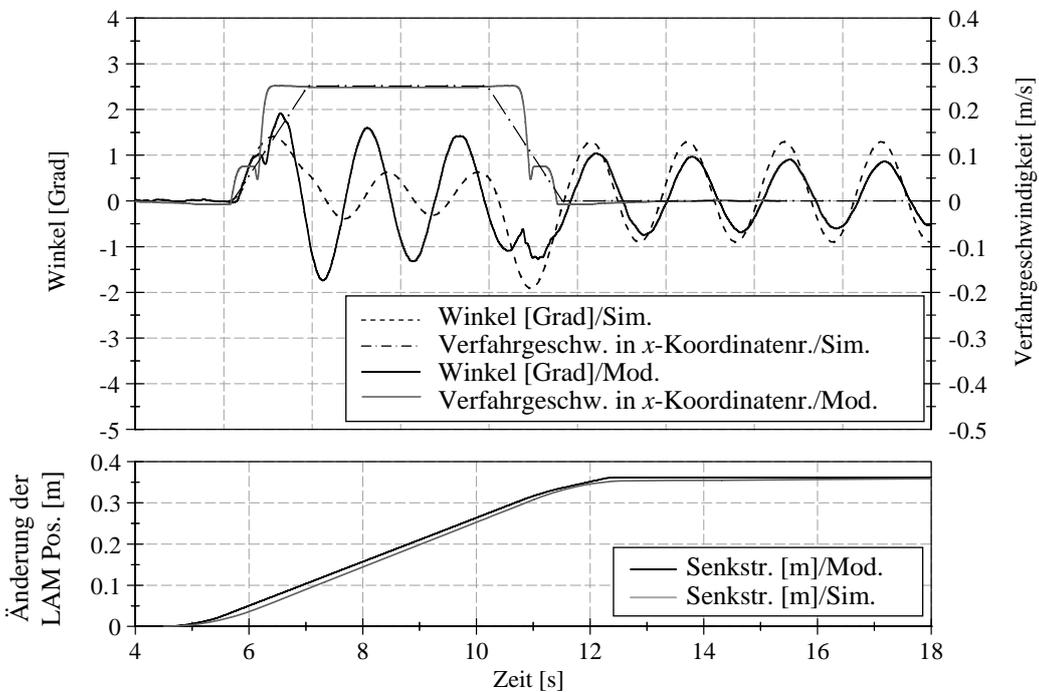
Ergebnisse der Modellversuche bei einer trapezförmigen Tragseilanordnung und einer veränderlichen Tragseillänge während des Verfahrens



| | | | |
|-------------------------------|----------|--|--------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 1,2 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 1,18°/0,433° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 1,05°/2,07 |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 2,82°/2,15° |

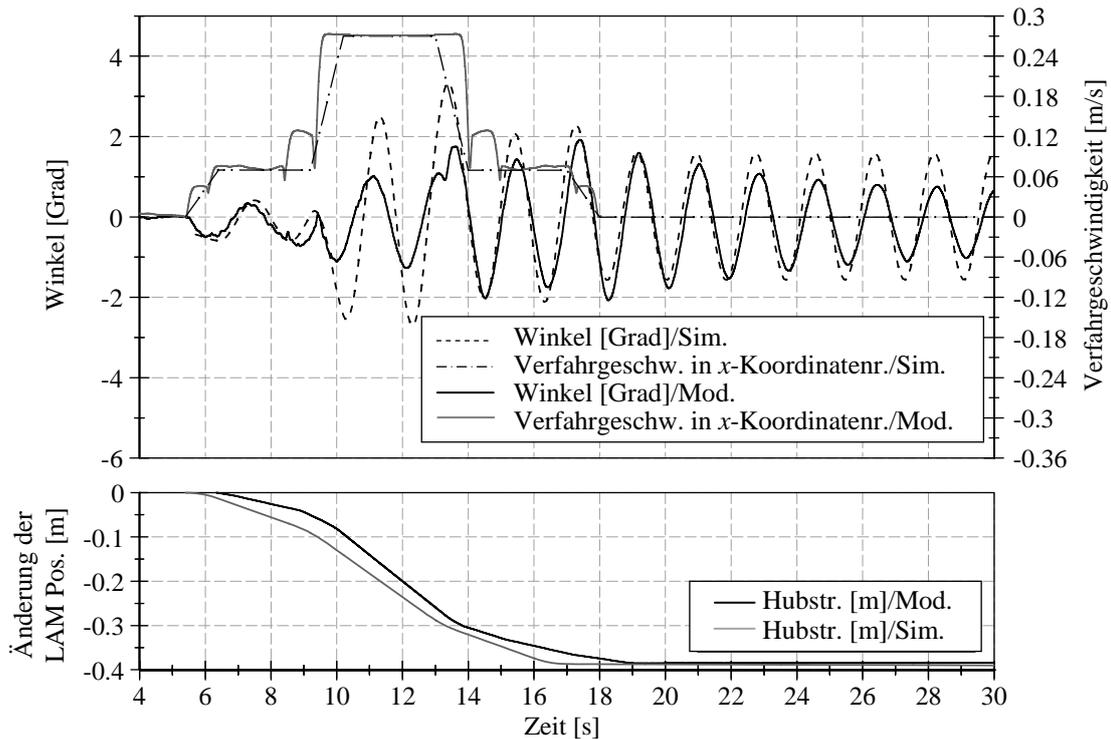
Abb. A.60 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1 und dem Heben der Last

**Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden*



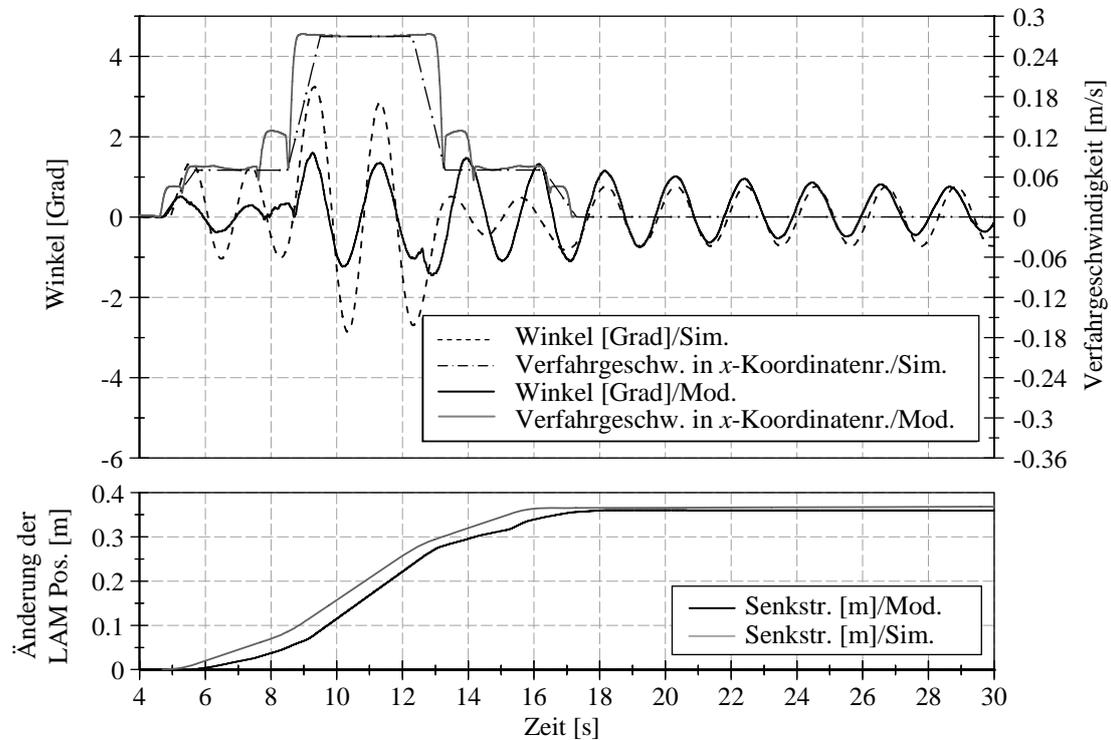
| | | | |
|-------------------------------|----------|--|-------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 0,85 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 1,1°/0,895° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,52°/1,46° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 1,91°/1,73° |

Abb. A.61 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 1 und dem Senken der Last



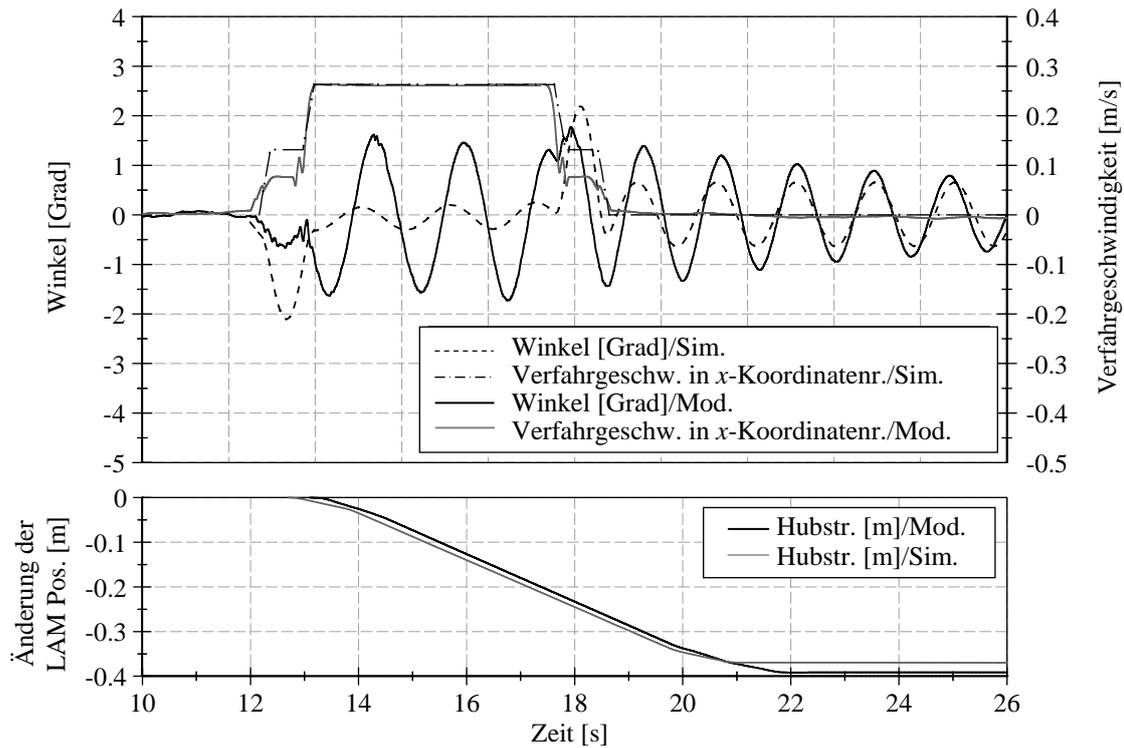
| | | | |
|-------------------------------|----------|--|-------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 1,2 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 1,57°/1,56° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 2,09°/1,59° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 3,32°/1,92° |

Abb. A.62 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2 und dem Heben der Last
 *Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden



| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 0,85 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 0,76°/0,88° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 2,86°/1,3° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 3,25°/1,60° |

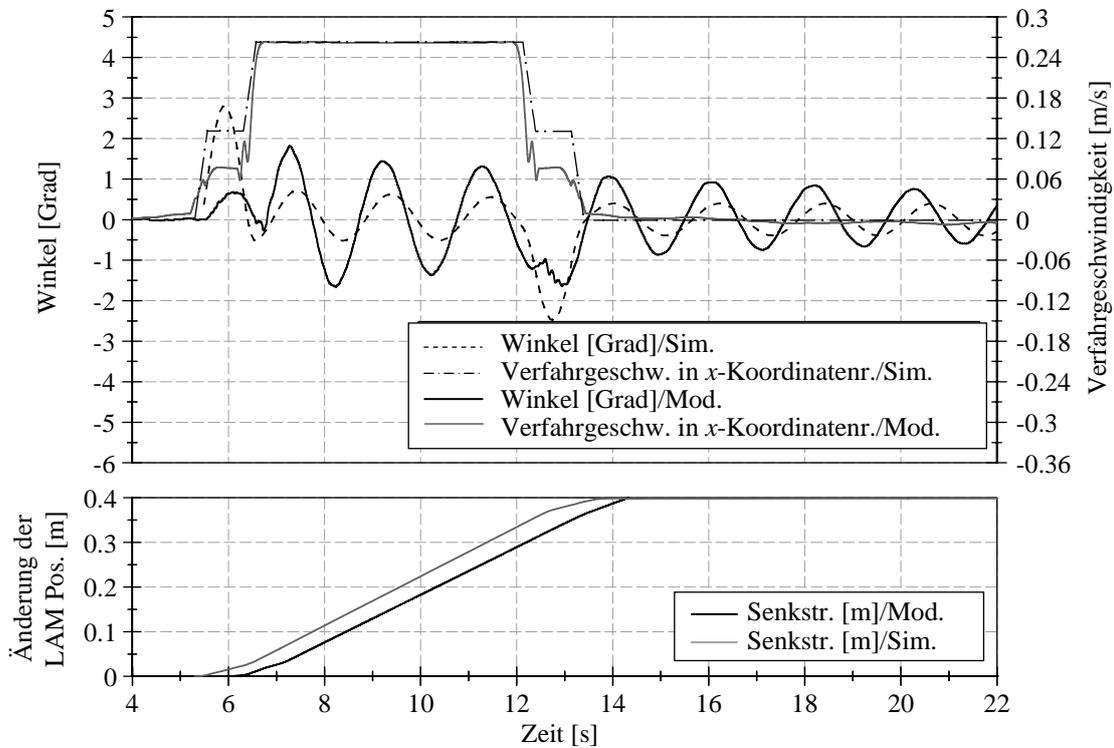
Abb. A.63 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 2 und dem Senken der Last



| | | | |
|-------------------------------|----------|--|-------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 1,2 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 0,66°/1,43° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,26°/1,59° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 2,19°/1,7° |

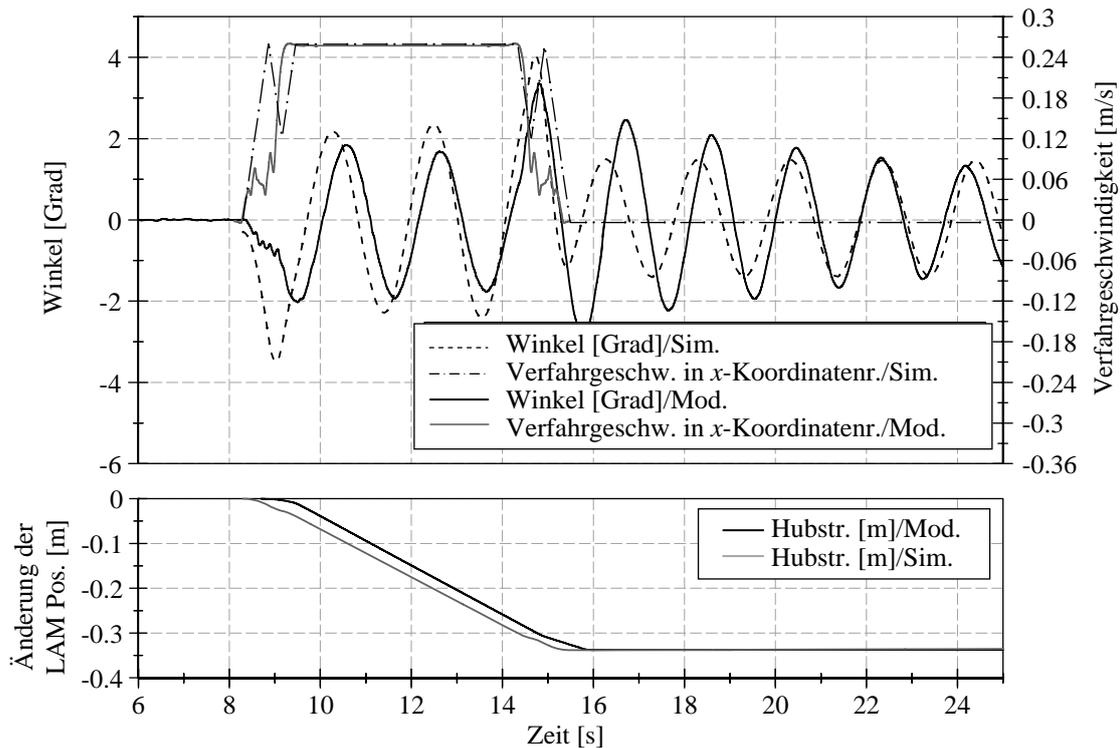
Abb. A.64 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3 und dem Heben der Last

**Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden*



| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 0,85 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 0,4°/0,96° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 0,62°/1,55° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 2,81°/1,82° |

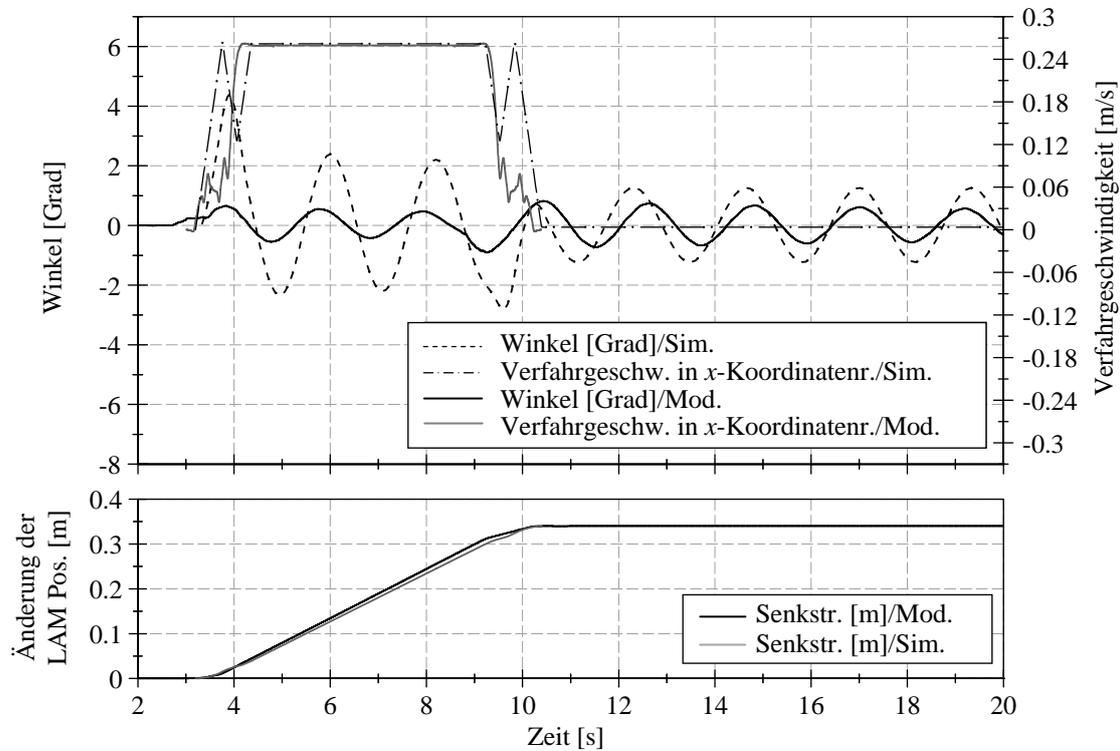
Abb. A.65 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 3 und dem Senken der Last



| | | | |
|-------------------------------|----------|--|-------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 1,2 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 1,48°/2,06° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 2,34°/1,89° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 3,72°/2,7° |

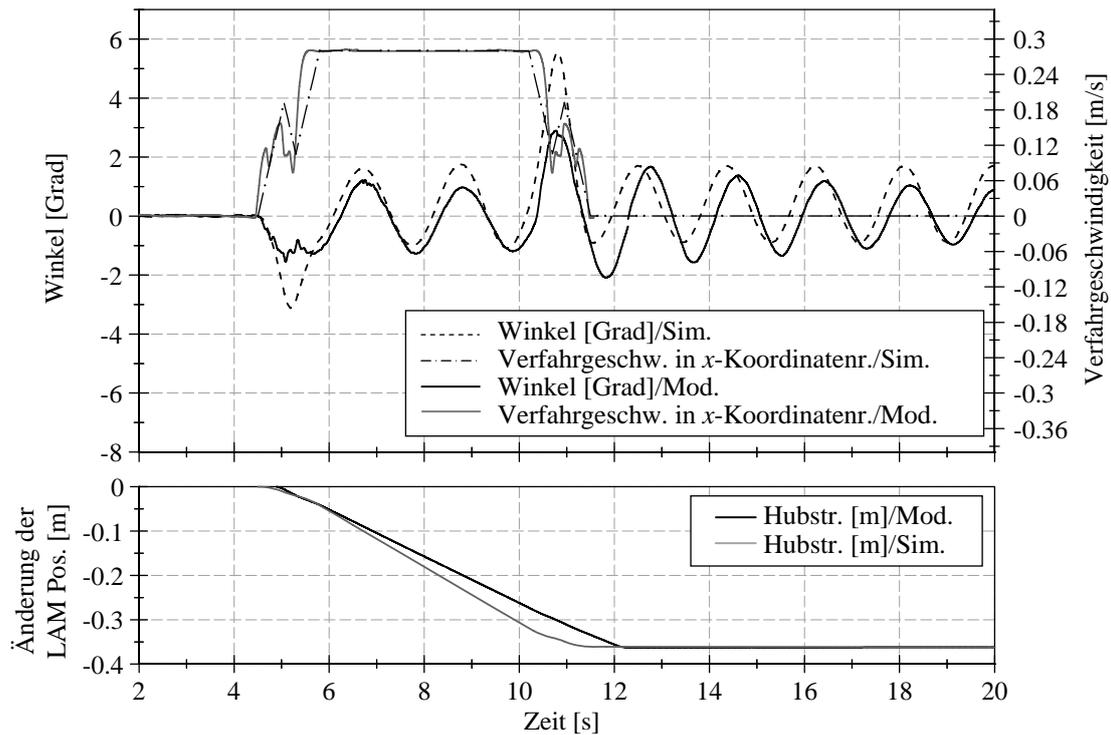
Abb. A.66 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4 und dem Heben der Last

**Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden*



| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 0,85 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 1,3°/0,77° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 2,38°/0,55° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 4,37°/0,87° |

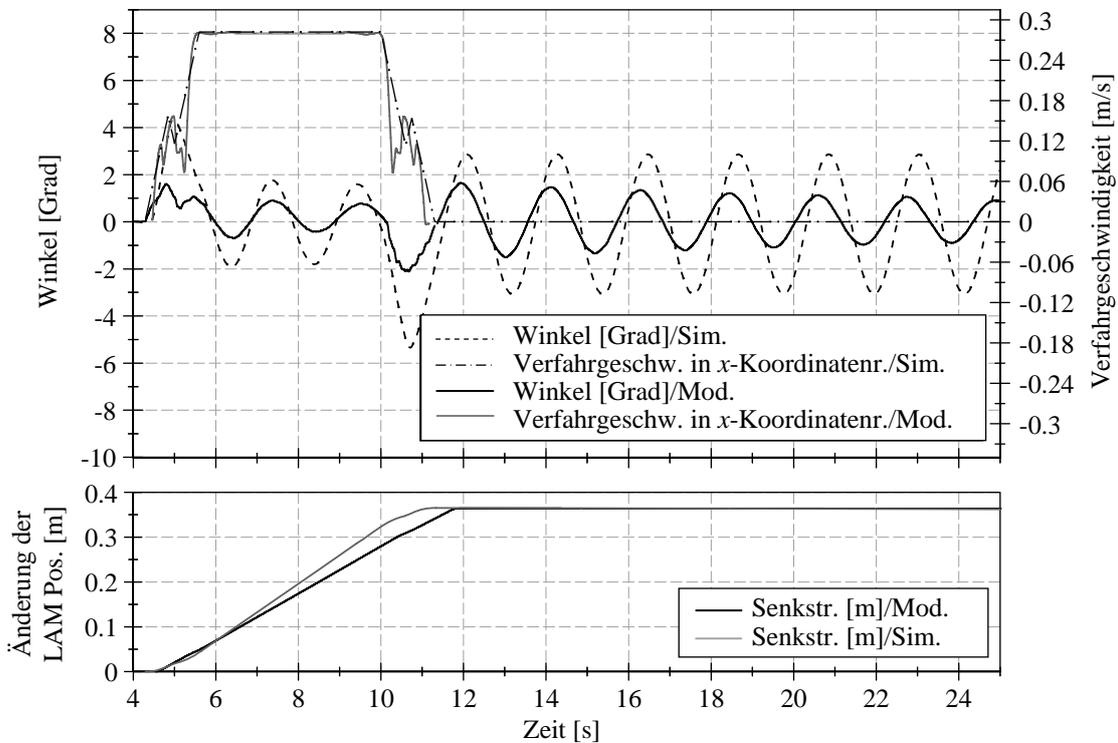
Abb. A.67 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 4 und dem Senken der Last



| | | | |
|-------------------------------|----------|--|-------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 1,2 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 1,33°/1,61° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 1,35°/1,27° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 5,56°/2,89° |

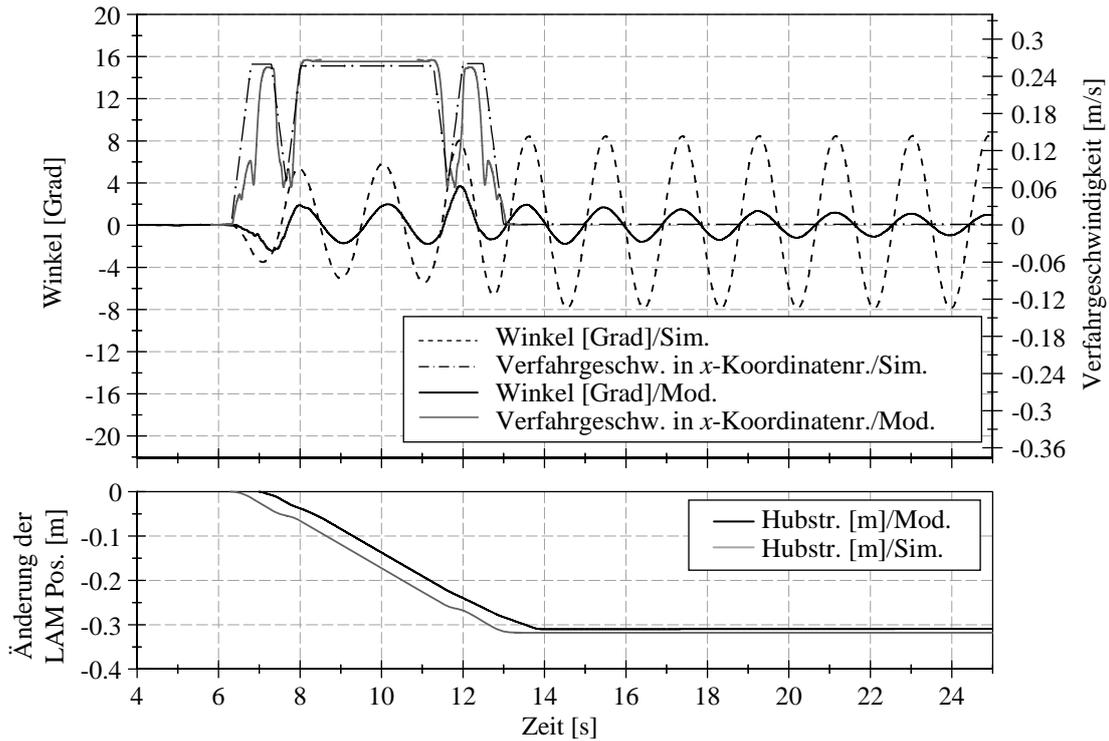
Abb. A.68 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5 und dem Heben der Last

*Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden



| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 0,85 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 2,98°/1,57° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 1,87°/0,81° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 5,34°/2,11° |

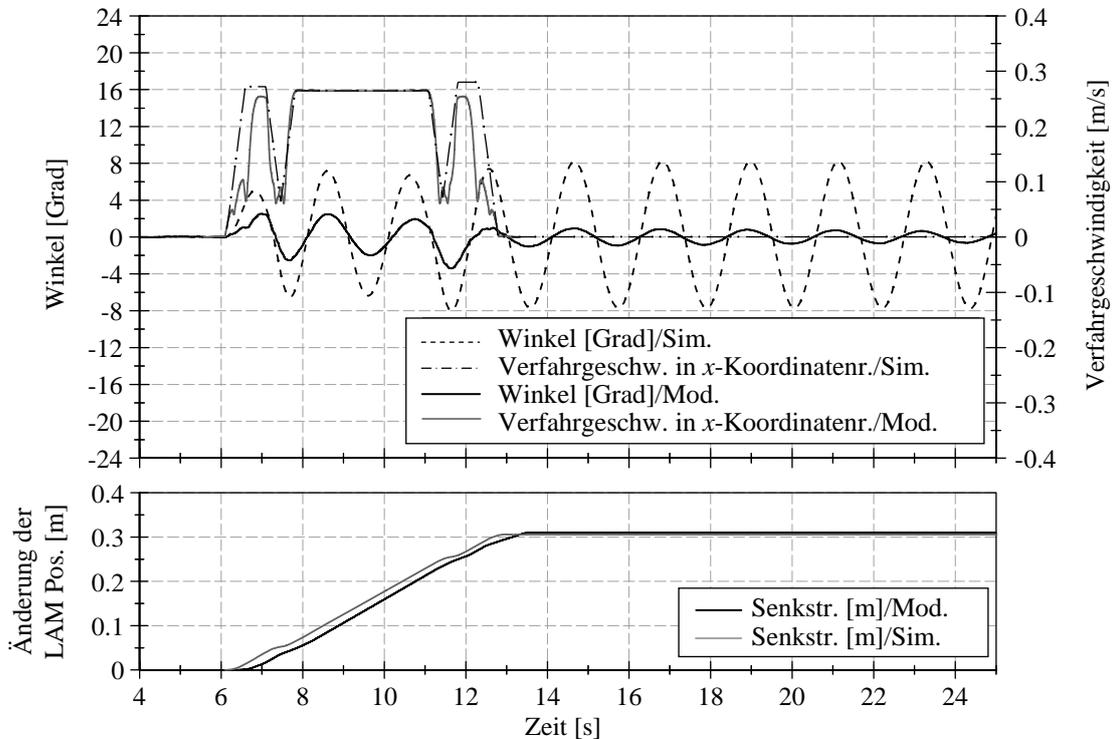
Abb. A.69 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 5 und dem Senken der Last



| | | | |
|-------------------------------|----------|--|-------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 1,2 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 8,18°/1,86° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 5,23°/1,81° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L^* : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 8,02°/3,71° |

Abb. A.70 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6 und dem Heben der Last

**Im Versuchsstand kann nur der Betrag der Hubgeschwindigkeit gemessen werden*



| | | | |
|------------------------------|----------|--|-------------|
| LAM Pos. h zu Beginn/Ende: | 0,85 m | Max. Winkel nach der Pos.(Sim./Mod.): | 7,94°/1° |
| Max. Verfahrgeschw. v_K : | 263 mm/s | Max. Winkel zw. den Beschl. (Sim./Mod.): | 6,8°/2,23° |
| Max. Verfahrgeschw. v_L : | 52 mm/s | Max: Winkel (Sim./Mod.): | 8,18°/3,41° |

Abb. A.71 Messergebnisse bei der Anwendung von Strategie 6 und dem Senken der Last

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Jörg Eller
geboren am 30.03.1980 in Castrop-Rauxel,
ledig

Anschrift:

Feldbank 70
44265 Dortmund
Tel.: 0173/9838173
Email: joerg.eller@tu-dortmund.de

Schulbildung:

08/1986 – 06/1990 Grundschule an der Lessingstraße in Castrop-Rauxel
08/1990 – 06/1999 Willy-Brandt-Gesamtschule in Castrop-Rauxel
Abschluss: Abitur

Zivildienst:

08/1999 – 06/2000 Zivildienst bei der Lebenshilfe e.V. in Waltrop

Studium:

10/2000 – 03/2006 Technische Universität Dortmund,
Diplomstudiengang Maschinenbau,
Vertiefungsrichtung: Maschinentechnik,
Abschluss: Diplom
04/2006 – 04/2009 Technische Universität Dortmund,
Promotionsstudiengang Graduate School of
Production Engineering and Logistics,
Fachgebiet Maschinenelemente

Studienbegleitend:

10/2004 – 04/2006 Studentische Hilfskraft,
Fachgebiet Maschinenelemente

Berufstätigkeit:

Seit 04/2009 Wissenschaftlicher Angestellter,
Technische Universität Dortmund
Fachgebiet Maschinenelemente

Dortmund, den 23.12.2009