

Ein neues Konzept zur Modellierung und Regelung von dynamischen Transportvorgängen in der industriellen Robotik in Echtzeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Informatik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Wilhelm August

aus Gurjew am Kaspischen Meer

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juli 2012
Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere wahrheitsgemäß, die Dissertation bis auf die dort angegebenen Hilfen selbständig angefertigt, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten anderer und eigenen Veröffentlichungen unverändert oder mit Änderungen entnommen wurde.

Karlsruhe, den 7. Juni 2012

Wilhelm August

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	vii
1. Einleitung und Motivation	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung der Arbeit	1
1.3. Lesen der Arbeit	2
2. Konzept und Aufbau der Arbeit	5
3. Stand der Forschung	11
3.1. Kontrollsysteme - ein kurzer Überblick	11
3.1.1. Steuerungssysteme ohne Rückkopplung	11
3.1.2. Regelungssysteme mit Rückkopplung	12
3.2. Pendeltransport	14
3.2.1. Überblick über Einsatzgebiete	14
3.2.2. Steuerungen	15
3.2.3. Regelungen	16
3.3. Transport unter Betrachtung und Minimierung der Querkräfte	17
3.3.1. Überblick über Einsatzgebiete	17
3.3.2. Steuerungen	19
3.3.3. Regelungen	19
3.4. Verfahren von mobilen Plattformen	20
3.5. Fazit	22
4. Pendel - eine hängende Last	23
4.1. Aufbau des physikalischen Modells	23
4.2. Ableitung der Bewegungsgleichungen	24
4.3. Mathematische Ableitung eines Riccati-Reglers	26
4.4. Experimenteller Aufbau	32
4.4.1. Roboter und Pendelaufhängung	32
4.4.2. Optischer Sensor und Bildbearbeitung	33
4.4.3. Struktur des Datenaustauschs und der Regelung	35
4.5. Simulationen und Simulationsergebnisse	37
4.5.1. Modellsimulation in Simulink	37
4.5.2. Physikalische Nachbildung und Simulation in Bullet	41

4.6.	Experimentelle Ergebnisse	44
4.7.	Schätzung der Pendellänge	48
5.	Inverses Pendel	51
5.1.	Aufbau des physikalischen Modells	51
5.2.	Ableitung der Bewegungsgleichungen	51
5.3.	Mathematische Ableitung eines Riccati-Reglers	52
5.4.	Simulationen und Simulationsergebnisse	53
5.4.1.	Modellsimulation in Simulink	53
5.4.2.	Physikalische Nachbildung und Simulation in Bullet	54
6.	Transport von zwei Pendeln	59
6.1.	Aufbau des physikalischen Modells	59
6.2.	Ableitung der Bewegungsgleichungen	59
6.3.	Mathematische Ableitung eines Riccati-Reglers	61
6.4.	Simulationen und Simulationsergebnisse	63
6.4.1.	Modellsimulation in Simulink	63
6.4.2.	Physikalische Nachbildung und Simulation in Bullet	66
7.	Transport einer Kugel auf einem Tablett	69
7.1.	Aufbau des physikalischen Modells	69
7.2.	Ableitung der Bewegungsgleichungen	70
7.3.	Mathematische Ableitung eines Riccati-Reglers	72
7.4.	Experimenteller Aufbau	73
7.4.1.	Roboter und Tablettkonstruktion	73
7.4.2.	Optischer Sensor und Bildbearbeitung	74
7.4.3.	Struktur des Datenaustauschs und der Regelung	74
7.5.	Simulationen und Simulationsergebnisse	74
7.5.1.	Modellsimulation in Simulink	74
7.5.2.	Physikalische Nachbildung und Simulation in Bullet	79
7.6.	Experimentelle Ergebnisse	80
8.	Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern	83
8.1.	Pendeltablett	83
8.1.1.	Experimenteller Aufbau und physikalisches Modell	83
8.1.2.	Physikalische Nachbildung mit Bullet	84
8.1.3.	Experimente und Ergebnisse	85
8.2.	Kugel auf Tablett	87
8.2.1.	Experimenteller Aufbau und physikalisches Modell	87
8.2.2.	Physikalische Nachbildung mit Bullet	88
8.2.3.	Experimente und Ergebnisse	88
8.3.	Fazit	93

9. Schwingungsausgleich beim Verfahren einer mobilen Plattform	95
9.1. Aufbau des physikalischen Modells	95
9.2. Ableitung der Bewegungsgleichungen	97
9.3. Mathematische Ableitung eines Riccati-Reglers	100
9.4. Simulationen und Simulationsergebnisse	103
9.4.1. Modellsimulation in Simulink	103
9.4.2. Physikalische Nachbildung und Simulation in Bullet	106
9.5. Stabilisierungs- und Transportsysteme im Einsatz auf einer mobilen Plattform	108
10. Zusammenfassung und Ausblick	111
10.1. Beiträge der Arbeit	112
10.2. Zukünftige Arbeiten	113
A. Matlab-Skripte zur Berechnung des Riccati-Reglers	115
A.1. System Pendel in Simulink	115
A.2. System inverses Pendel in Simulink	116
A.3. System zwei Pendel an den Enden eines Stabes in Simulink	116
A.4. System Kugel auf Tablett in Simulink	118
A.5. System mobile Plattform mit einem Roboterarm in Simulink	119
A.6. System Pendel in Bullet	120
A.7. System inverses Pendel in Bullet	120
A.8. System zwei Pendel an den Enden eines Stabes in Bullet	121
A.9. System Kugel auf Tablett in Bullet	122
A.10. System mobile Plattform mit einem Roboterarm in Bullet	123
B. Simulink-Modelle	125
B.1. System zwei Pendel am Ende eines Stabes	125
B.2. System eine Kugel auf einem Tablett	125
B.3. System mobile Plattform	125
C. Abkürzungsverzeichnis	133
Abbildungsverzeichnis	136
Literatur	137
Lebenslauf	147

1. Einleitung und Motivation

1.1. Motivation

Der Wohlstand unserer heutigen Gesellschaft resultiert aus schneller und effektiver Massenproduktion. Viele Gebrauchsgegenstände aus unserem Alltag, die unser Leben bereichern, wie das Mobiltelefon, der Computer, das Auto und vieles mehr sind auf dem neuesten Stand der Technik und im höchsten Maße komplex. Sie werden erst durch effiziente kostenoptimierte Produktionsprozesse für uns erschwinglich.

Laut dem Duden steht das Wort 'Produktionsprozess' für „Erzeugung, Herstellung von Waren und Gütern“ [27]. In den meisten Herstellungsprozessen wird Material bewegt und Einzelteile zu einem Endprodukt zusammengesetzt. Will man einen Produktionsprozess optimieren, muss die Dynamik des Prozesses, also der „(...) Einfluss der Kräfte auf die Bewegungsvorgänge von (physikalischen) Körpern“ [27] verstanden und optimiert werden. Durch Beschleunigen von Körpern entstehen nach dem zweiten Newton'schen Axiom Trägheitskräfte, die den Transport unter Umständen negativ beeinflussen können.

Heutzutage werden in den Herstellungsprozessen für den Transport von Gütern oft industrielle Roboter eingesetzt. Diese sind je nach Einsatzgebiet im Allgemeinen schneller, präziser und können schwere Lasten transportieren oder monotone Aufgaben erledigen ohne körperliche oder geistige Ermüdung. In Folge dieser ausgezeichneten Eigenschaften können Transportaufgaben von Robotern grundsätzlich genauer und schneller ausgeführt werden als von Menschenhand.

Die Motivation hinter dieser Arbeit ist es, eine Herangehensweise an dynamische Systeme zu entwickeln mit dem Ziel diese zu verstehen, zu modellieren und effizient zu regeln.

1.2. Zielsetzung der Arbeit

Transportvorgänge und die damit verbundenen Schwierigkeiten unterscheiden sich in der Regel voneinander. Ein Beispiel für einen schwer beherrschbaren Transportvorgang ist der Transport einer Last als Pendel in der Weise, dass das Pendel während des Transports kontrolliert schwach schwingt und im Zielpunkt schwingungsfrei ruht. Der Vorgang ist deshalb schwierig zu kontrollieren, da durch die Bewegung des Aufhängepunkts nur eine Kraft auf die Last in Richtung des Fadens ausgeübt und damit

die Bewegung der Last nur indirekt beeinflusst werden kann. Eine direkte Krafteinwirkung erfährt die Last nur bei einer Bewegung in Richtung des Fadens. Bei einem seitlichen Transport setzt sich die resultierende Kraft auf den Körper aus der Gewichtskraft und der Kraft, die durch den Aufhängepunkt entlang des Fadens auf die Last wirkt, zusammen.

Ein weiteres Beispiel ist der Transport eines Objekts, das auf einem Tablett liegt. Kräfte, die bei diesem Transport auftreten, können mit Hilfe einer Kugel besonders gut sichtbar gemacht werden. Die Kugel beginnt zu rollen, wenn die Gesamtkraft auf die Kugel eine Komponente parallel zum Tablett aufweist. Soll das Objekt zu jedem Zeitpunkt des Transports an gleicher Stelle auf dem Tablett liegen bleiben, müssen die Bewegung und die Orientierung des Tabletts so aufeinander abgestimmt werden, dass die Gesamtkraft auf die Kugel stets senkrecht in die Unterlage zeigt. Um die Querkräfte zu vermeiden oder zumindest zu minimieren, muss man ihre Entstehung verstehen und mathematisch erfassen.

Hat man die oben beschriebenen Querkräfte unter Kontrolle, so ist auch der Transport von Flüssigkeiten weitgehend problemlos. Denn genau diese Kräfte sind dafür verantwortlich, dass die Flüssigkeit im Behälter zu schwingen anfängt und bei zu starken Schwingungen überschwappt.

Auch im Bereich der mobilen Serviceroboter können beim Transport störende Effekte auftreten. Aus Gründen der Mobilität besitzen mobile Plattformen meist eine schmale Basis und durch den schweren Aufbau (Akkus, Roboterarm usw.) einen relativ hohen Schwerpunkt. Je schmaler die Basis und je höher der Schwerpunkt, desto größer ist die Tendenz zu schwingen. Durch abruptes Beschleunigen und Abbremsen werden unerwünschte Schwingungen angeregt, welche die eigentlichen Arbeiten (Platzierung von Objekten, Bedienung von Schaltern usw.) behindern.

Diese kurze Auflistung der möglichen Szenarien zeigt, dass bei jeder Transportart unterschiedliche Gegebenheiten berücksichtigt werden müssen. In dieser Arbeit wird ein Konzept vorgestellt mit dem ein dynamischer Transport modelliert und geregelt werden kann. Das Vorgehen beinhaltet die Aufstellung des physikalischen Modells, Ableitung der mathematischen Beschreibung in Form von Differentialgleichungen, Modell- und physikalische Simulationen und das Experiment. Durch eine breite Auswahl von Anwendungsfällen wird die Universalität des Vorgehens veranschaulicht.

1.3. Lesen der Arbeit

Das Erscheinungsbild der Arbeit wurde mit dem freien PDF-Reader SumatraPDF [85] optimiert. Sie kann aber selbstverständlich mit jedem beliebigen PDF-Reader gelesen werden.

Diagramme, physikalische Modelle und Skizzen sind mit dem Package PGFPlot [67] erstellt. Dies ermöglicht ein weites Hineinzoomen in die Darstellung, wenn Interesse für bestimmte Details besteht.

Alle Darstellungen, Formeln, Abkürzungen und Kapitel in der Arbeit sind verlinkt. Mit einem Klick auf die Zahl im Textverweis oder auf den Namen im jeweiligen Verzeichnis gelangt man zum Zielobjekt. Durch drücken der Tastenkombination 'Alt+Pfeiltaste links' erfolgt ein Sprung zurück an die Stelle im Text. Verlinkungen sind nicht farblich hervorgehoben. Man erkennt sie dadurch, dass der Mauszeiger zum Zeigefinger wird wenn die Maus über dem Objekt platziert wird.

Farben spielen in den Darstellungen eine große Rolle. Die Folgenden zwei Punkte sollen durch den Einsatz der Farben das Lesen der Arbeit erleichtern.

- Wenn in der Modellbeschreibung im Text Raumrichtungen in bestimmten Koordinatensystemen (KS) beschrieben werden, z. B.: „Schwingung in α -Richtung“, dann wird die Größe, welche die Richtung bestimmt (hier α) in der Farbe dargestellt, in der auch das KS im physikalischen Modell dargestellt ist. In Abbildung 9.1 sind die möglichen Richtungen $x, y, z / \alpha, \beta, \gamma / \phi, \theta, \rho$.
- In Diagrammen werden zusammengehörende Größen in einer Farbe dargestellt. Z. B. gehören in der Darstellung des physikalischen Modells eines Pendels in Abbildung 4.1 die Richtungen x und β bzw. y und α zusammen, weil die Raumachsen in dieselbe Richtung zeigen und eine Bewegung des Aufhängepunkts in x -Richtung eine Schwingung in β -Richtung auslöst. Aus diesem Grund werden x und β blau und y und α rot dargestellt. Die Darstellung der allein stehenden Größe y erfolgt dann meistens in grün.

In Zahlen werden Dezimalstellen in dieser Arbeit einheitlich durch einen Punkt abgetrennt.

2. Konzept und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit präsentiert eine Vorgehensweise mit dem dynamische Systeme sehr effektiv modelliert, mathematisch beschrieben, simuliert und geregelt werden können. Diese Vorgehensweise ist durch zwei Besonderheiten ausgezeichnet:

- Es gibt klare Richtlinien wie ein dynamisches System physikalisch beschrieben und geregelt werden kann;
- Wie in dieser Arbeit gezeigt wird, ist die Vorgehensweise auf viele unterschiedliche dynamische Systeme anwendbar.

Wie man der Tabelle 2.1 entnimmt, werden sechs verschiedene Systeme behandelt:

- *Pendel* als Modell für eine hängende Last, die durch die Bewegung des Aufhängepunkts im Raum kontrolliert transportiert wird.
- *Inverses Pendel*, ein Klassiker der Regelungstechnik, ist hier, wie in Abbildung 2.1 durch einen Pfeil angedeutet, ein Nebenprodukt aus der Behandlung des einfachen Pendels. Da das inverse Pendel ein höchst instabiles System ist, dient es als eine Herausforderung an das Beschreibungskonzept.
- Das System *Zwei Pendel am Ende eine Stabes* steht hier als Beispiel für ein sehr komplexes System, das mit dem vorgestellten Konzept beschrieben und geregelt werden kann.
- *Eine Kugel auf einem Tablett* ist aus der Sicht der mathematischen Behandlung das komplizierteste System von den hier behandelten. Dieses lässt sich ebenfalls hervorragend mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Konzept behandeln und dient vor allem dazu die beim Transport entstehenden Kräfte zu nutzen.
- Die im vorhergehenden Punkt erwähnten Kräfte sind vor allem beim *Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern* von Bedeutung. Querkräfte, die im Allgemeinen jeden Transportvorgang begleiten, können unerwünschte Schwingungen in der Flüssigkeit hervorrufen. In der gleichen Weise lassen sich auch andere Transportsysteme behandeln, bei denen eine Minimierung der Querkräfte beim Transport von Bedeutung ist.

- Die Behandlung einer *mobilen Plattform* stellt den wissenschaftlichen Höhepunkt der Arbeit dar. Behandelt werden Schwingungen, die aus Beschleunigungsphasen entstehen. Zur Unterdrückung der Schwingungen wird der Roboterarm benutzt, der den Aufbau der Plattform bildet.

Des Weiteren gibt die Tabelle 2.1 einen Überblick darüber, in welcher Weise die physikalischen Systeme behandelt werden. Zu jedem System wird ein *physikalisches Modell* aufgestellt. Beim Aufstellen des physikalischen Modells stehen folgende Punkte im Vordergrund:

- Einfachheit und
- Allgemeingültigkeit bzw. Anpassbarkeit der Modelle an reale Systeme.

Die in dieser Arbeit behandelten physikalischen Systeme sind im höchsten Maße komplex. Bei jedem System wird versucht das Modell möglichst einfach zu gestalten, um eine mathematische Beschreibung zu ermöglichen. Durch eine möglichst allgemeine Beschreibung können die Modelle an reale Systeme angepasst werden. Eine genaue Vorschrift zum Aufstellen der Modelle gibt es nicht. Der Leser muss ein Gefühl dafür entwickeln.

Anschließend werden aus dem physikalischen Modell nach dem Lagrange'schen Prinzip Bewegungsgleichungen abgeleitet. Die Bewegungsgleichungen beschreiben in Form von Differenzialgleichungen (DGL) die zeitliche Entwicklung des Systems. Alle Größen, die notwendig sind, um den Zustand des Systems in einer eindeutigen Weise zu beschreiben, werden zu einem Zustandsvektor \mathbf{x} zusammengefasst.

Aus den Bewegungsgleichungen lässt sich ein *Regler auf der Basis der vollständigen Zustandsrückführung* berechnen, welcher in der Zustandsregelung als Standardregler gilt. Der präsentierte Regler ist bei allen Systemen universell einsetzbar und in seiner linearisierten Form echtzeitfähig. Auf seine Ableitung wird in Kapitel 4 detailliert eingegangen und jeder Berechnungsschritt und der theoretische Hintergrund dazu werden genau beschrieben. Individuelle systemspezifische Unterschiede werden in den jeweiligen Kapiteln behandelt.

Der *Einfluss der Zustandsgewichtungsmatrix \mathbf{Q}* auf die Funktionsweise des Reglers wird am Beispiel des Transportsystems einer Kugel auf einem Tablett behandelt. Hier werden die Möglichkeiten zur Feinabstimmung des Reglers aufgezeigt.

Anschließend folgen zu jedem System zwei Abschnitte zur Simulation. Diese erfolgt in zwei Schritten:

- Im ersten Schritt wird das physikalische System auf der Basis der abgeleiteten Bewegungsgleichungen in *Simulink* [57] simuliert und die Wirkung des Reglers, der ebenfalls in Simulink implementiert ist, auf dieses System getestet. Hier zeigt sich, ob die Annahmen über die Steuerbarkeit richtig waren und ob und in welchem Bereich der meist linearisierte Regler effektiv einsetzbar ist. Ein weiterer wichtiger Aspekt, der hier untersucht wird, sind die für eine effektive Regelung

System	phys. Modell	Riccati-Regler	Einfluss von Q	Simulink-Simulation	Bullet-Simulation	Vergleich Bullet/Exp.
Pendel	✓	✓	○	✓	✓	✓
Inverses Pendel	Pend.	✓	○	✓	✓	○
Zwei Pendel	✓	✓	○	✓	✓	○
Kugel auf Tablett	✓	✓	in Simulink	✓	✓	✓
Flüssigkeitentransport	Pend./Tabl.	Pend./Tabl.	○	✓	✓	✓
Mob. Plattform	✓	✓	○	✓	✓	○

Tabelle 2.1.: Überblick über behandelte Systeme und Themen

benötigten Beschleunigungen. Bereits in diesem Schritt können Manipulatoren aufgrund dieser unzureichenden Eigenschaft ausgeschlossen werden.

- Im zweiten Schritt erfolgt eine Simulation mit Hilfe der *Physik-Engine Bullet* [16]. Hier wird das aufgestellte Modell vollständig und physikalisch richtig simuliert. Dabei besteht die Möglichkeit verschiedene Regler, insbesondere den hier präsentierten, mit einem physikalischen Modell-System zu testen. In der Praxis werden alle Parameter des Reglers mit Hilfe der Bullet-Simulation angepasst.

Die Systeme Pendel und Kugel auf einem Tablett werden auch als *reales Experiment* behandelt. In den entsprechenden Kapiteln wird auf den experimentellen Aufbau, den optischen Sensor und die Struktur der Implementierung des Reglers in C/C++ eingegangen. Experimentelle und simulierte Ergebnisse werden miteinander verglichen und diskutiert. Der Vergleich zeigt bei beiden Systemen eine sehr gute Übereinstimmung. Der *Transport von Flüssigkeiten* in offenen Behältern wird in dieser Arbeit ebenfalls experimentell untersucht und in Form von Filmaufnahmen festgehalten. Da sich aber die Schwingung einer Flüssigkeit nur schwer aufnehmen und in einem Diagramm darstellen lässt, werden nur physikalische Simulationen von Transportexperimenten mit Flüssigkeiten in offenen Behältern ausgewertet und diskutiert.

Die Arbeit ist als detaillierter technischer Bericht zu sehen. Die einheitliche Vorgehensweise wird am System Pendel sehr genau erklärt. Deshalb ist es für einen technisch interessierten Leser ratsam die Lektüre mit Kapitel 4 anzufangen. Alle Schritte sind sowohl als Text als auch als MATLAB-Skripte [56] im Anhang dokumentiert. Jeder Berechnungsschritt ist damit nachvollziehbar und reproduzierbar. Aus den Gründen der schlechten Lesbarkeit und des großen Umfangs wurde der C/C++-Code nicht in die Arbeit aufgenommen.

Abbildung 2.1 zeigt einen Überblick über den Aufbau der Arbeit.

Nach der Einleitung und dem Kapitel über das Konzept der Arbeit wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung präsentiert. In diesem wird auf

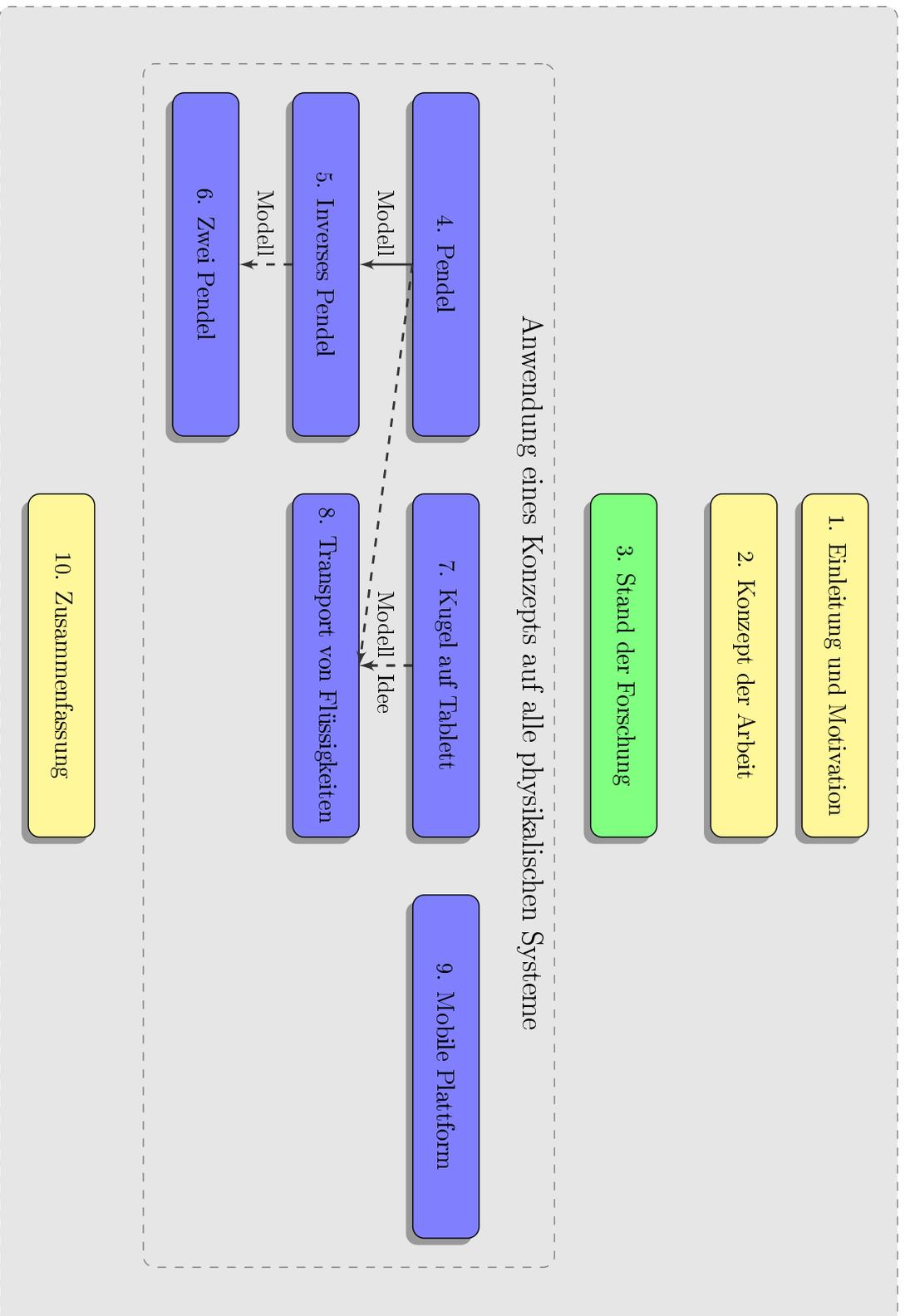


Abbildung 2.1.: Aufbau der Arbeit.

Regelungs- und Steuerungssysteme der folgenden Szenarien eingegangen:

- Transport hängender Lasten
- Transport unter Minimierung der Querkräfte
 - Transport einer Kugel auf einem Tablett
 - Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern
- Schwingungsunterdrückung beim Verfahren von mobilen Plattformen

Im Mittelpunkt stehen verschiedene Methoden, die für den Transport eingesetzt werden.

Im anschließenden Hauptteil der Arbeit werden fünf unterschiedliche dynamische Systeme mit einem Beschreibungs- und Regelungskonzept behandelt. Der sich wiederholende Aufbau der einzelnen Kapitel spiegelt sich im Inhaltsverzeichnis wieder.

Die thematischen Verbindungen unter den Kapiteln sind durch Gruppierung bzw. durch Pfeile angedeutet. So wird z. B. das Modell des einfachen Pendels ohne Änderung für das inverse Pendel verwendet. Bei der Ableitung der Bewegungsgleichungen wird lediglich ein anderes Vorzeichen für die obere Halbebene des Pendelkoordinatensystems gewählt. Auch das physikalische Modell des Systems zweier Pendel am Ende eines Stabes basiert auf dem System des einfachen Pendels.

Beim Transport einer hängenden Last durch Verschiebung des Aufhängepunkts wird die Kraft, die auf den Aufhängepunkt wirkt durch den Faden auf die Last übertragen. Durch eine geeignete Aufhängung eines Tablett (z. B. eine Dreipunktaufhängung) erreicht man, dass der Faden und damit die Kraft auf das Tablett immer senkrecht auf der Tablettoberfläche steht und damit keine Querkräfte auf Objekte, welche sich auf dem Tablett befinden, wirken. Zusammen mit dem kontrollierten Transport des Pendels ist ein von Querkräften freier Transport realisiert. Wie der gestrichelte Pfeil in Abbildung 2.1 andeutet, wird diese Idee in Kapitel 8 aufgegriffen.

In Kapitel 7 werden Querkräfte anhand einer Kugel auf einem Tablett untersucht. Eine Kugel beginnt zu rollen, wenn die Kraft, die auf sie wirkt eine Komponente tangential zur Tablettoberfläche hat. Damit können die Kräfte sehr einfach sichtbar gemacht werden. Das in diesem Kapitel vorgestellte Transportsystem ermöglicht es, die Querkräfte so einzusetzen, dass die Kugel gezielt auf dem Tablett platziert wird. Hier werden Ansätze zur Verfügung gestellt, die Querkräfte gezielt einsetzen und, falls nötig, vermieden. In Kapitel 8 werden diese Konzepte im Zusammenhang mit dem Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern wieder aufgegriffen.

Kapitel 9 stellt eine neue Idee vor, wie mit Hilfe eines Roboterarms auf einer mobilen Plattform Schwingungen der Plattformbasis ausgeglichen werden können. Durch eine kompakte Bauweise und einen meist hohen Schwerpunkt lassen sich mobile Roboter in Beschleunigungsphasen oft zu Schwingungen anregen. In diesem Kapitel wird eine Methode vorgestellt, wie unerwünschte Schwingungen mit Hilfe des Roboterarms unterdrückt werden können.

2. Konzept und Aufbau der Arbeit

Kapitel 10 fasst die Ergebnisse der Kapitel aus dem Hauptteil zusammen. Die wichtigsten Ergebnisse werden hervorgehoben und die wissenschaftlichen Beiträge der Arbeit zusammenfassend dargestellt. Der Überblick über die Arbeit und ein kurzer Ausblick über zukünftige Arbeiten runden die vorliegende Arbeit ab.

3. Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung im Hinblick auf die Minimierung der Querkräfte vorgestellt. Dabei liegt der Fokus auf folgenden drei Transportszenarien:

- Transport von hängenden Lasten am Beispiel eines *Pendels* (auch *inverses Pendel*)
- Transport von Lasten unter Betrachtung und Minimierung der Scherkräfte
 - Transport von beweglichen unbefestigten Teilen auf einer ebenen Unterlage am Beispiel einer *Kugel auf einem Tablett*
 - Transport von *Flüssigkeiten in offenen Behältern*
- *Schwingungsfreies Verfahren* von mobilen Serviceplattformen mit flexiblen Aufbauten (Roboterarm, Stewartplattform usw.)

Zunächst werden zwei grundsätzlich unterschiedliche Kontrollstrategien von Systemen mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt:

- *Steuerung*, ein Kontrollsystem *ohne Rückkopplung* und
- *Regelung*, ein Kontrollsystem *mit Rückkopplung*.

3.1. Kontrollsysteme - ein kurzer Überblick

3.1.1. Steuerungssysteme ohne Rückkopplung

Dieses Kontrollsystem arbeitet ohne Informationen über den tatsächlichen Zustand des Systems. In den meisten Fällen wird die Bahn auf der Basis des physikalischen Modells und der a priori bekannten Transportroute im Voraus berechnet und geformt. Man nennt diese Vorgehensweise auch *Preshaping*. Dabei wird vollständig auf jegliche Art von Sensorik verzichtet. Für den Transport hängender Lasten haben sich folgende drei Methoden bewährt:

Methode der Beschleunigungspulse (oder später *Input-Shaping*) bedient sich der Tatsache, dass nur Beschleunigungsphasen des Transports Kräfte hervorrufen, die ihrerseits Schwingungen erzeugen. Die Idee ist durch eine Pulsfolge Schwingungen, die von vorhergehenden Pulsen unvermeidlich angeregt wurden, auszulöschen.

Kontinuierliche Kräftekompensation berücksichtigt die Transporttrajektorie. Bei dieser Methode wird die zweite Ableitung der Bahn nach der Zeit berechnet, welche der Beschleunigung und damit der Kraft entspricht. Unter Berücksichtigung der berechneten Kräfte wird eine neue Trajektorie berechnet, die durch den geänderten Verlauf die Schwingungen des Pendels unterdrückt.

Dynamische Programmierung/Optimierung nennt sich eine Methode, bei der die Bewegungsgleichungen in Form von gewöhnlichen Differenzialgleichungen (**O**rdinary **D**ifferential **E**quations, ODE) mit festen Randbedingungen meist durch numerische Integration gelöst und bezüglich der Zeit optimiert werden. Das Ergebnis der Berechnung ist wie bei anderen Methoden eine optimale Bahn im Raum.

Beim Transport unter Minimierung der Querkräfte werden, ähnlich wie bei der kontinuierlichen Kompensation, die beim Transport entstehenden Kräfte berechnet. Bei der Planung einer neuen Bahn wird die Orientierung des Greifers in der Weise angepasst, dass die resultierende Kraft in die gewünschte Richtung zeigt. Bei einer Kugel auf einem Tablett, sowie bei einem Sauggreifer ist dies die zur Tablettoberfläche bzw. Saugfläche senkrecht stehende Achse.

Wenn es um den Schwingungsausgleich beim Verfahren von mobilen Serviceplattformen geht, ist der Einsatz einer Steuerung ohne die Kenntnis des vorliegenden Zustands erschwert. Das Verfahren eines mobilen Roboters geschieht oft spontan. Deshalb ist eine Bahnplanung bzw. Bahnformung im Vorfeld der Bewegungsausführung schwierig. Nichtsdestotrotz ist die Berechnung des Ausgleichs mit der Kenntnis des Weges möglich.

Der große Vorteil der Steuerung ist, dass für die Bahnberechnung keinerlei Sensoren benötigt werden. Dadurch vereinfacht sich das Design und die fehlende Datenauswertung schlägt sich positiv in der Rechenzeit nieder. Ein wichtiges Argument für den Einsatz der sensorlosen Methode ist auch, dass die im Voraus berechnete Bahn ungeachtet der äußeren Einflüsse nicht verlassen wird. Damit können Teile in sehr engen Umgebungen transportiert werden.

Der klare Nachteil ist, dass ein so gestaltetes Kontrollsystem aufgrund der fehlenden Sensoren nicht in der Lage ist auf spontane Änderungen und äußere Einflüsse zu reagieren. Der Ausgangszustand des Transports ist ebenfalls immer fest. Dies ist meistens ein sich in Ruhe befindendes System. Liegt ein anderer Anfangszustand vor, kann kein sinnvoller sicherer Transport gewährleistet werden.

3.1.2. Regelungssysteme mit Rückkopplung

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass bei Regelungssystemen mit Rückkopplung Informationen über den vorliegenden Zustand des Systems dazu benutzt werden, den Transport zu kontrollieren und zu optimieren. Rückkopplung heißt in diesem Zusammenhang, dass die Wirkung der Steuergröße auf das Verhalten des Systems direkt

oder indirekt beobachtet wird und der Output des Systems in die Berechnung der Steuergrößen eingeht.

Im Folgenden erfolgt ein kurzer Überblick über die gängigsten Reglerarten, die zum Regeln von den oben genannten Systemen eingesetzt werden:

Der PID-Regler ist ein Standard-Rückführungs-Regler, welcher die Regelgröße mit der Führungsgröße vergleicht und durch eine Kombination aus seiner proportionalen, integrierenden und differenzierenden Komponente eine Stellgröße bestimmt, die auf die Regelstrecke (hier: physikalisches System) einwirkt.

Der Fuzzy-Regler basiert auf der Fuzzy-Logik, der Logik der unscharfen Zustände. Sogenannte Zugehörigkeitsfunktionen bilden die Zustände des Systems auf Fuzzy-Mengen ab. Diese Logik kommt vor allem dann zum Einsatz, wenn sich ein komplexes System entweder schwer oder gar nicht mathematisch erfassen lässt. Die Fuzzy-Logik stellt eine Approximation der Zustände dar und darin liegen auch ihre Nachteile. Sie ist per Definition nicht immer genau ([109], [28]).

Künstliche Neuronale Netze (KNN) sind lernfähige Netze aus sogenannten Neuronen, die ebenfalls zur unscharfen Entscheidungsfindung bei komplexen, mathematisch schwer beschreibbaren Systemen eingesetzt werden können. Bei einer Entscheidungsfindung gewichtet jedes betroffene Neuron im Netz die Eingangsinformation nach seiner internen Gewichtungsfunktion und gibt die Information an seine Nachfolger weiter. Je nach Topologie des KNN können sehr komplexe, unscharfe oder nichtlineare Systeme modelliert werden. In der Trainingsphase wird die Gewichtung der Entscheidungsfunktion von jedem betroffenen Neuron nach festen Lernregeln verändert und so die Reaktion des KNN angepasst. KNN werden oft in verschiedenen Kombinationen mit der Fuzzy-Logik eingesetzt ([49]).

Der Regler auf der Basis der Zustandsrückführung wird aus den Bewegungsgleichungen des Systems abgeleitet und stellt eine moderne Art der Regelung dar. Bei dieser Regelung wird das Gesamtsystem betrachtet und geregelt. Das physikalische System wird durch einen Zustandsvektor beschrieben, der den Zustand des Systems zu jedem Zeitpunkt eindeutig charakterisiert. Das Steuersignal ist meist ein mehrdimensionaler Vektor, der aus dem Matrixprodukt des aktuellen Zustandsvektors mit der Rückführungsmatrix berechnet wird und durch Rückführung auf das physikalische System einwirkt. Man unterscheidet zwischen

- *vollständiger Rückführung*, bei welcher der komplette Zustandsvektor zurückerführt wird. Damit ist der Zustand des physikalischen Systems vollständig bekannt.
- Wenn der Zustand des System nicht vollständig bekannt ist, wird der sogenannte *Beobachter* oder *Observer* verwendet. Mit diesem werden fehlende Informationen mit Hilfe des Modells rekonstruiert.

In Verbindung mit einem Zustandsregler werden oft zusätzliche Filter (z. B. der Washout-Filter), klassische Regler (PID-Regler) oder neuartige Regler (z. B. der Feedforward-Regler) benutzt.

Nachteile eines solchen Systems liegen darin, dass die Reaktion des Systems bei zu großen äußeren Einflüssen unberechenbar wird. Spontane Einflüsse haben unerwartete Reaktionen des Reglers zur Folge. Der Roboter kann dabei an die physikalischen Grenzen seines Arbeitsbereichs stoßen und die Umgebung dadurch zu Schaden kommen. Ausreißer dieser Art müssen in diesem Fall durch zusätzliche Sicherheitsmechanismen abgefangen werden.

Einer der Vorteile liegt darin, dass ein Regelungssystem mit Rückkopplung im Allgemeinen in der Lage ist auf unvorhersehbare äußere Einflüsse zu reagieren. Dies ist zum Beispiel bei Seitenwinden oder kleineren Kollisionen der Fall. Aber auch geometrische Ungenauigkeiten wie z. B. die Pendellänge können in einem bestimmten Maße variieren, ohne dass das Transportsystem komplett versagt. So kann der Regler ohne eine Neuberechnung für z.B. Pendel leicht unterschiedlicher Längen benutzt werden. Der Bewegungsablauf ist dabei allerdings nicht mehr optimal.

Ein weiterer großer Vorteil ist, dass der Ausgangszustand für den Transport kein fester sein muss. Das heißt z.B., dass ein im Startpunkt bereits schwingendes Pendel in einen anderen Raumpunkt transportiert werden kann und dort ruhend ankommt.

In den folgenden Kapiteln wird auf die in dieser Arbeit untersuchten Szenarien eingegangen und ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung erstellt. Dabei wird sowohl auf die Steuerung als auch auf die Regelung als Kontrollsystem eingegangen.

3.2. Pendeltransport

3.2.1. Überblick über Einsatzgebiete

Zum Thema Pendeltransport finden sich sehr viele Veröffentlichungen zu *industriellen Krananlagen* zum Be- und Entladen von Schiffscontainern vom Ufer so wie auch von einem Schiff aus. Seit den späten Achtzigern bis Anfang der letzten Dekade wurde auf diesem Gebiet viel geforscht und veröffentlicht: [76], [75], [10], [77], [54], [68], [53], [22], [6], [98], [5], [7], [86], [70] und viele weitere. Der Transport eines Pendels mit einem Kran erfordert in den meisten Fällen eine Änderung der Fadenlänge. Damit kommt ein weiterer Freiheitsgrad in der Betrachtung hinzu. Die Schwierigkeiten sind meist unerwartete Begebenheiten wie Wellengang oder Seitenwinde.

Die Veröffentlichungen auf dem Gebiet der *Robotik* sind weniger zahlreich aber dadurch nicht weniger interessant: [83], [84], [82], [19], [18], um hier ein paar 'Klassiker' und aktuelle Arbeiten aus den letzten zehn Jahren zu nennen. Hier stehen im Vergleich zu industriellen Krananlagen flexiblere und schnellere Manipulatoren mit mehr Freiheitsgraden für Experimente zur Verfügung. [18] behandelt z. B. sogar neben den

Schwingungen um den Aufhängepunkt auch die Torsionsschwingung um die Fadenachse.

In fast allen Publikationen werden physikalische *System- und Regler-Modelle* abgeleitet. In [81] findet man die ersten Skizzen zum Thema Input-Shaping aus zwei und mehr Impulsen. Singhorse et al. benutzen in [79] für die Darstellung der Pulse ein Vektordiagramm. Hier können die Vektoren mit Hilfe der Vektoraddition in der Weise kombiniert werden, dass ihre Wirkung auf ein Pendelsystem Schwingungen reduziert. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass kein vollständiges physikalisches Modell des Systems benötigt wird. Die Methode kommt mit charakteristischen Zeiten, wie die Periodendauer aus.

Das Aufstellen von Modellen eines inversen Pendels und die Ableitung des Reglers für Aufschwingvorgänge ist ein sehr oft behandeltes Thema. Die Publikationen sind so zahlreich, dass hier nur drei exemplarisch genannt werden. Die Behandlung des inversen Pendels konzentriert sich meist auf den Aufschwingvorgang. Astroem und Furuta [9] schlagen eine Methode zum Aufschwingen des Pendels unter Betrachtung der Energiemaximierung vor. Diese Methode lässt sich direkt auf ein einfaches Pendel anwenden. In diesem Fall wird die Gesamtenergie des Systems minimiert. Graichen hat sich auf dem Gebiet der dynamischen Programmierung und Optimierung bereits in den jungen Jahren einen Namen gemacht. In seiner Veröffentlichung [35] modelliert er ein zweifaches Pendel und schlägt eine Strategie zum Aufschwingen vor. Simulation und Experimente untermauern seine theoretischen Aussagen. Das Arbeitsteam um Shiriaev präsentiert in [78] ein vollständiges Modell eines sphärischen Pendels. Sie behandeln das Modell in der Theorie und leiten einen Regler für das System ab. In Simulationen demonstrieren sie die Wirkung des Reglers auf das abgeleitete Modell.

3.2.2. Steuerungen

Als Urvater des Preshapings gilt Smith, der im Jahre 1957 in seiner Veröffentlichung [81] einen sogenannten 'Posicast Control' präsentiert hat. Bei diesem Controller werden in für das Pendel charakteristischen Zeitabständen Beschleunigungspulse erzeugt, welche die durch den ersten Beschleunigungspuls angeregte Schwingung nach und nach minimieren. In seinen Betrachtungen zieht Smith Analogien zwischen dem Pendel und einem elektrischen RLC-Schwingkreis, in dem er Schwingungen mit Spannungspulsen unterdrückt. Im gleichen Paper präsentiert Smith die Idee einer Rückführungsregelung mit einem Feedforward-Teil. Dieser Teil des Reglers gibt die Beschleunigungssignale vor, während das physikalische System durch einen Rückführungs-Teil geregelt wird.

Ein weiterer oft zitierter Autor ist Starr mit seinen Arbeiten [83] und [84], in welchen er die Idee von Smith wieder aufgreift und weiterverfolgt. Während in der ersten Arbeit vorwiegend theoretische Betrachtungen zu finden sind, präsentiert [84] experimentelle Ergebnisse mit einem industriellen Roboter, dessen besondere Eigenschaft es war mit konstanter Geschwindigkeit entlang einer Linie zu fahren. Es ist eine der wenigen Arbeiten, die Transportvorgänge durch industrielle Roboter betrachtet. In den meisten

Arbeiten werden spezielle Krananlagen behandelt. An der Idee hinter dem Transport ändert sich dadurch nichts.

Ein weiterer Autor namens Smith präsentierte in Zusammenarbeit mit Starr eine Arbeit, die den Transport von Lasten mit einer Zweipunkt-Aufhängung von zwei Manipulatoren gleichzeitig transportiert werden [82].

Im Laufe der Jahre hat sich aus der Herangehensweise mit Beschleunigungspulsen eine Methode entwickelt, die sich *Input-Shaping* nennt. Ein bekannter, viel zitierter Vertreter dieser Art von Steuerung ist Singhose. Seit seiner ersten Veröffentlichung [79] verfolgte er die Idee in mehr als 20 Veröffentlichungen. Im Jahre 2009 stellte er in [80] einen Überblick über Command-Shaping der letzten 50 Jahre zusammen. In seiner aktuellsten Veröffentlichung aus diesem Jahr [39] beschäftigt er sich mit Input-Shaping in Verbindung mit einem PI-Feedback-Regler verallgemeinert auf Trägheitssysteme.

Zum Thema Input- oder Command-Shaping gibt es zahlreiche weitere Publikationen ([62], [54], [68] und viele andere), die sich vor allem mit Schwerlastkrananlagen auseinandersetzen. Diese Anlagen werden meist von Menschenhand gesteuert und durch Preshaping der Transportroute in der Weise unterstützt, dass die Lasten mit minimaler Schwingungsamplitude transportiert werden. Aber auch in der Robotik kommt die Methode zum Einsatz. Das Team um Chang präsentiert in [18] ein Schnell-Positionierungs-System auf der Basis des Preshapings, das sogar Schwingungen um die Fadenachse, die durch Drehbewegungen um die Hauptdrehachse des Roboters entstehen, durch einen zusätzlichen Freiheitsgrad des Roboters berücksichtigt.

Die sogenannte *kontinuierliche Kräftekompensation* als Mittel gegen ein unkontrollierbares Aufschaukeln schlug die Arbeitsgruppe um Chen vor ([21], [19]). Die Idee dabei ist, dass mit der vorgeplanten Transporttrajektorie die komplette Information über die auf die Last wirkenden Kräfte gegeben ist. Diese Informationen werden benutzt, um eine neue Bahn zu berechnen, welche die Kräfte in der Weise berücksichtigt, dass die Schwingung erst gar nicht aufkommt.

Eine weitere Methode zur Berechnung eines optimalen Weges für den Transport einer hängenden Last ist die sogenannte *dynamische Optimierung* ([10], [106]). Bei dieser Methode werden ODE mit festen Randbedingungen meist mit einem Reihenansatz gelöst und bezüglich des Parameters Zeit zusätzlich optimiert. Die Voraussetzung für den Erfolg des Transports ist, wie im Prinzip bei allen Steuerungen, dass der Ausgangszustand, also die Randbedingung sehr genau eingehalten wird. Diese Methode wird sowohl als Preshaping-Methode alleine als auch in Verbindung mit einem Feedback-Controller verwendet.

3.2.3. Regelungen

Ein sphärisches Pendel ist ein komplexes nichtlineares mathematisches Problem. Eine Linearisierung der Bewegungsgleichungen vereinfacht die mathematische Beschreibung, schränkt aber auch den Wirkungsbereich des daraus abgeleiteten Reglers ein. Dieses Problem versuchte die Arbeitsgruppe um Suzuki in [87] erfolgreich mit einem

Fuzzy-Regler zu umgehen. Ihre Zugehörigkeitsfunktionen stellten sie mit Hilfe eines erfahrenen Kranführers auf.

Ein Fuzzy-Regler wird auch oft in Kombination mit anderen Reglern eingesetzt, wie z. B. in den Arbeiten [22] und [4]. Die erstgenannten kombinierten einen Positions-Regler, der im System bereits integriert war, mit einem Fuzzy-Regler, der beim Transport die Schwingung der Last regelte. In der zweiten Arbeit kommt neben einem Fuzzy-Regler auch noch ein Zustandsregler zum Einsatz.

Ein Fuzzy-Regler wird auch in der Arbeit [7] präsentiert. Für jeden Freiheitsgrad des Krans wird hier ein Fuzzy-Regler eingesetzt und verschiedene Tests gefahren. In den aktuelleren Publikationen [104], [97], [17] werden Fuzzy-Regler bei komplexen, schwer modellierbaren Krananlagen eingesetzt, um Ungewissheiten über die Masse oder die Massenverteilung der Last zu behandeln. Fuzzy-Regler werden auch benutzt, wenn die Antwort des Systems schwer modellierbar ist. In [97] wird eine Acht-Punkt-Aufhängung benutzt, die an sich schon ein Aufschaukeln verhindern soll. Eine Restschwingung wird mit einem Fuzzy-Regler ausgeglichen.

In [39] kommt ein klassischer *PID-Regler* zum Einsatz, um die Abweichungen vor einer im Voraus berechneten Bahn (Preshaping) zu regeln. Wie bereits erwähnt, können verschiedene Arten von Steuerungen und Regelungen miteinander kombiniert werden.

In dieser Arbeit wird für den Transport und die Stabilisierung des Pendels ein Regler auf der Basis der vollständigen Zustandsrückführung verwendet, ein *Zustandsregler* (vgl. auch [11], [64]). Den Input des Reglers bildet ein Zustandsvektor, welcher den Zustand des Systems zu jedem Zeitpunkt in einer eindeutigen Weise beschreibt. Die Stellgröße der Regelstrecke bildet der Reglerausgang, der den Zustand des Systems zu einem gewünschten Zustand optimiert. Wenn der Zustand des Systems nicht vollständig beobachtbar ist, kann ein Observer zum Schätzen des Zustands eingesetzt werden [77]. In [5] wird eine Command-Shaping-Methode mit einem Zustandsregler kombiniert, damit ein im Voraus berechneter Transportablauf eingehalten werden kann.

Auf dem Gebiet des inversen Pendels schlägt [35] eine Kombination aus einem Feedforward-Regler mit einem Zustandsregler vor. Hier wird mit Hilfe der dynamischen Programmierung ein Aufschwingvorgang berechnet und optimiert. Dieser wird im anschließenden Experiment durch den Zustandsregler überwacht.

3.3. Transport unter Betrachtung und Minimierung der Querkräfte

3.3.1. Überblick über Einsatzgebiete

Im Zusammenhang mit dem Transport von Objekten mit Hilfe von mobilen Robotern wurden Methoden entwickelt durch Beschleunigungsphasen entstehende Querkräfte zu minimieren. Der Vorschlag von Dillmann et al. in den Publikationen [32], [33] und [34]

war der Einsatz eines Hexapods oder wie es auch genannt wird, einer Stewart-Plattform. Das sind zwei Platten, die durch sechs lineare Gelenke miteinander verbunden sind. Damit kann die obere Platte relativ zur unteren in sechs Freiheitsgraden verstellt werden. Hexapode werden oft in Flug- und Fahrsimulatoren eingesetzt, um Beschleunigungen zu simulieren. Hier wird der Hexapod auf dem mobilen Roboter platziert, um für einen aktiven Beschleunigungsausgleich unter Verwendung eines Washout-Filters zu sorgen. Nach der Vorarbeit mit Decker in [25] präsentieren Dang und Ebert-Uphoff in [24] ihren 'Augmented Pendulum'-Algorithmus. Dieser Algorithmus betrachtet die Schwingung eines Pendels, das frei von Querkräften schwingt. Ein sogenannter 3RRR Roboter, der das Objekt führt, folgt dieser gedachten Bewegung und minimiert damit bei der Fahrt entstehende Querkräfte. Eine weitere Publikation aus der Robotik brachte Chen heraus [21]. Hier erfolgte die Validierung eines Beschleunigungskompensationsansatzes mit einem KUKA KR-16 Industrieroboter.

Ein sehr beliebtes und aktuelles Thema von vielen Veröffentlichungen ist der Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern: [88], [101], [63], [102], [44], [21], [90], [14], [50], [8] um hier nur einige von den aktuellen Arbeiten zu nennen. Das Problem beim Transport ist, dass die durch die Beschleunigung des Containers entstehenden Querkräfte die Flüssigkeit zum Schwingen und im schlimmsten Fall zum Überlaufen bringen. Oft müssen die Container möglichst schnell transportiert werden, weil sonst der Inhalt, z. B. eine Metallschmelze zu stark abkühlt und dadurch ein Qualitätsverlust entsteht. Andererseits muss der Transport sicher erfolgen, weil man den Materialverlust und eine Kontaminierung der Umgebung vermeiden möchte. Auch die Modellierung und Regelung von Eingießvorgängen ist Thema laufender Forschung (vgl. [100]). In allen hier zitierten Publikationen wird das Verhalten der Flüssigkeit als ein gedämpftes Pendel modelliert.

Ein weiteres spannendes Thema ist das Verhalten des flüssigen Treibstoffs in den Tanks von Fahr- und Flugzeugen, das die Dynamik der Fahrt oder des Flugs auch negativ beeinflussen könnte. Dazu werden in [91], [46] und [72] Modelle aufgestellt und die entsprechenden Systeme behandelt. In [91] werden zwei interessante Arten von Sensoren vorgestellt. Der erste funktioniert wie ein Mikrofon und misst die Luftdruckschwankungen über der Oberfläche. Der zweite Vorschlag misst als Schwimmer auftretende Beschleunigungen. In [29] wird ein Modell eines aktiven Getränkehalters im Auto präsentiert. Dieser reagiert auf beim Fahren auftretende Beschleunigungen und kompensiert diese durch Anpassung der Orientierung des Bechers.

Sehr viele aktuelle Veröffentlichungen findet man auch zum Thema eine Kugel auf einem Tablett: [13], [94], [93] und [92], [59], [61], [26], [60], [55], [107] und [12], um hier die interessantesten und die aktuellsten zu nennen. Ein Buch aus dem Jahr 1982 [73] behandelt im Allgemeinen einen schonenden Transport von Früchten. Viele davon sind rund geformt und haben damit die Tendenz beim Transport wegzurollen. Alle anderen hier genannten Publikationen, auf die im nächsten Abschnitt einzeln eingegangen wird, setzen sich vor allem mit der Modellierung und der Regelung des spannenden Systems auseinander. Der moderne Regler ist meistens eine Kombination aus mehreren Reglern

([94], [59]). Sehr beliebt sind lernfähige Systeme auf Fuzzy-Logik in Verbindung mit neuronalen Netzen ([60], [61]).

Zia präsentiert einen Algorithmus, der es ermöglicht eine Kugel auf dem Tablett entlang einer vorgegebenen Bahn zu bewegen [108]. Viele interessante Möglichkeiten zum Tracken der Kugel werden vorgestellt. Unter den Exoten sind der Kraft-Momenten-Sensor ([105], [52]) und das Touch-Display ([13], [108]) beliebt. Die meisten Arbeiten verwenden aber ein optisches Tracking unter dem Einsatz von CCD-Kameras.

In [95] wird ein Levitationssystem behandelt, ein System des kontaktlosen Transports von sensiblen Objekten mit Hilfe des elektromagnetischen Feldes. Da es hier so gut wie gar keine Reibungseffekte gibt, ist es besonders wichtig Querkräfte beim Transport zu eliminieren. Aus diesem Grund werden in der Arbeit viele Publikationen aus dem Bereich Kugel auf einem Tablett zitiert.

3.3.2. Steuerungen

Die Veröffentlichungen zu Steuerungen eines Transportsystems unter Minimierung der Querkräfte sind nicht sehr zahlreich. In den wenigen, die ausfindig gemacht werden konnten, ist Pre- oder Input-Shaping ein großes Thema ([88], [71], [8]). Hier werden auf der Basis des Modells bzw. der charakteristischen Schwingungsdauer des Systems Beschleunigungsimpulse berechnet, die zu bestimmten Zeiten auf das dynamische System einwirken. Die Pulsfolge bewirkt, dass durch die vorangegangenen Impulse erzeugten Schwingungen wieder ausgelöscht werden. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in Experimenten validiert. Die Arbeit von Pridgen [71] entstand in Zusammenarbeit mit Singhorse (vgl. Preshaping beim Pendel). Da hier ebenfalls ein schwingungsfähiges System durch Beschleunigung angeregt wird, ist dieselbe Methode zur Behandlung der Schwingungen verwendbar.

Chen behandelt in ihren Arbeiten [20] und [21] mit aktiver Beschleunigungskompensation sowohl ein Transportsystem für Flüssigkeiten in offenen Behältern als auch eine Methode mit der z. B. ein Sauggreifer richtig belastet werden kann. Ein Saug- oder Vakuumbreifer zeichnet sich dadurch aus, dass er normal zur Saugfläche deutlich stärker belastet werden kann als quer dazu. Mit ihren Ergebnissen untermauert sie die abgeleiteten Modelle.

Die Arbeiten [36] und [37] von Grundelius behandeln ein Transportsystem eines mit einer Flüssigkeit gefüllten Containers. Der Stand der Flüssigkeit kann in diesem Aufbau nicht überwacht werden. Durch zahlreiche Tests stellen die Autoren ein Modell auf, das ihnen erlaubt die Bewegung in der Weise zu erzeugen, dass die Flüssigkeit beinahe in Ruhe bleibt.

3.3.3. Regelungen

Die Zahl der Publikationen zu Regelungen von Transportsystemen mit dem Ziel Querkräfte zu minimieren sind deutlich zahlreicher als zu Steuerungen. Die behandelten

Systeme sind im höchsten Maße nichtlinear, komplex und auf äußere Einflüsse sensibel, so dass sich hier eine Regelung mit einer Überwachung des Systemzustandes empfiehlt.

Die bereits zitierte Publikation von Dang und Ebert-Uphoff [24] schlägt einen Regler auf der Basis ihres 'Augmented-Pendulum'-Algorithmus vor. Dabei wird die Bewegung der mobilen Plattform, die mit einem 3RRR Roboter ausgestattet ist, mit einem Beschleunigungssensor überwacht. Der Roboter lässt auf der Basis der Plattformbewegung ein imaginäres Pendel 'schwingen' und ermöglicht dadurch einen kräftefreien Transport.

Da sich das Verhalten der Flüssigkeit nur schwer beobachten und auswerten lässt, werden bei den Regelungen sogenannte Observer oder Beobachter verwendet ([74], [26]). Diese schätzen den Zustand auf der Basis der bekannten Zustände und eines Systemmodells. Alle hier zitierten Publikationen verwenden als Modell für die Flüssigkeit im Container ein gedämpftes Pendel.

[105] präsentiert einen Roboterarm der einen Tischtennisball auf einem vom Roboterarm gehaltenen Tischtennisschläger mit Hilfe eines optischen Tracking-Systems und eines Fuzzy-Reglers balanciert. Weitere Publikationen stellen lernfähige Systeme vor, wie den sogenannten Reinforcement Learning Fuzzy Controller (RLFC) aus [60] oder eine Kombination aus hierarchisch angeordneten Neuronen aus [61].

In [107] und [14] wird für den Transport eines Containers mit Flüssigkeit in [46] mit einem Fahrzeug ein klassischer PID-Regler eingesetzt. Oft werden, wie bei der Regelung eines Pendels, verschiedene Regler miteinander kombiniert. In [89] kommt ein PID-Regler in Kombination mit einem Inverse-Dynamics-Controller zum Einsatz und in [94] wird ein PD-Regler mit einem Fuzzy-Regler kombiniert. Ob in Kombination mit einem anderen Regler oder im Alleingang findet der Zustandsregler (meist mit einem Observer) ebenfalls eine Anwendung ([74], [26] u.w.)

3.4. Verfahren von mobilen Plattformen

Bei allen bis jetzt beschriebenen Systemen lag der Schwerpunkt der Betrachtung auf dem zu transportierenden Objekt. Im ersten Teil dieses Kapitels durfte es nicht oder nur kontrolliert schwingen und im zweiten Teil durfte es nicht rollen, rutschen oder überschwappen. Bei fast allen Transportvorgängen wird neben der Nutzlast auch der Manipulator bewegt. Bei mobilen Robotern spielt die Eigendynamik eine große Rolle. Mobile Serviceroboter haben aus Mobilitätsgründen meistens eine schmale Basis und einen hohen Aufbau, und damit eine Tendenz zu schwingen. Im Hauptteil dieser Arbeit wird eine mobile Plattform mit einem Roboterarm als Aufbau im Hinblick auf Eigendynamik untersucht. Mit dem in dieser Arbeit präsentierten Konzept werden ein allgemeines Modell einer mobilen Plattform aufgestellt, Bewegungsgleichungen abgeleitet und ein Zustandsregler berechnet, der Schwingungen der Plattformbasis mit Hilfe der Armbewegung unterdrückt. In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick

über die aktuellen Publikationen zu Untersuchungen von gewollten und ungewollten Schwingungen in der Robotik präsentiert.

Ein Zusammenspiel aus richtungsabhängiger Oberflächenreibung und Massenschwingungen kann zur Fortbewegung von physikalischen Körpern benutzt werden, der sogenannten apedalen undulatorischen Lokomotion. Die Ideen kommen meist aus der Natur, aus Fortbewegungsstrategien von Lebewesen. Vereinfacht und auf das nötigste reduziert, werden die Methoden auch in der Robotik eingesetzt. In den letzten zehn Jahren stechen die Publikationen aus der Arbeitsgruppe um Zimmermann heraus [38], [41], [110], [15]. In der Dissertation von Huang [38] findet sich neben einer sehr detaillierten Literaturrecherche auch ein Überblick über Fortbewegungsmuster in der Tierwelt. Nach einer eingehenden Untersuchung der Bewegungsstrategien werden diese modelliert und die Bewegung simuliert. In [41], [110] und [15] wird die frequenzgesteuerte Fortbewegung von mobilen Robotern in der technischen Anwendung, sowie in Rohrleitungen untersucht.

Schwingungen beim Transport von Lasten in der industriellen Robotik sind dagegen ein zu vermeidender Störfaktor ([69], [47], [96], [99], [48], [103]). Alle hier genannten Publikationen arbeiten Steuerungen ohne Rückführung von Zustandsinformationen aus, die auf der Basis der bekannten Transportstrecke die Transportbahn optimal planen. In [69] untersuchen Park et al. Transportvorgänge mit Hilfe eines Industrieroboters mit flexiblen Gelenkverbindungen. Sie schlagen eine Methode 'TVIST' (**T**ime-**V**arying **I**nteraction **S**haping **T**echnique) vor, die mit Hilfe von Input-Shaping eine schwingungsmindernde Transporttrajektorie für den industriellen Manipulator vorgibt.

Kojama und Kibe untersuchen in [47] einen zweigelenkigen flexiblen Roboterarm. Mit Hilfe einer sogenannten Fitness-Funktion optimieren sie die Transportbahn in ihren numerischen Simulationen und Experimenten.

In den Arbeiten [96], [48] und [103] werden ebenfalls der Transport von Lasten mit Multi-Gelenk-Robotern behandelt. Hier werden Steuerungen vorgestellt, die auf der Basis der bekannten Transporttrajektorie eine optimierte Bahn für den Transport planen und damit Schwingungen des Manipulators vermeiden.

[99] präsentiert einen Ansatz zur Schwingungsunterdrückung in einem flexiblen Roboterarm, indem Auslöschungen von mechanischen Wellen in Medien untersucht werden.

Ein wichtiges Thema in der industriellen Robotik sind mobile Roboter auf Rädern ([40], [45], [3], [2], [1]). Da die Publikationen auf diesem Gebiet sehr zahlreich sind, wird hier nur ein kurzer Überblick über die aktuellsten Arbeiten erstellt. Im Fokus der Betrachtungen stehen meist Roboter auf zwei Rädern ([3], [2], [1]). In diesen Arbeiten wird ein Zwei-Rad-Roboter mit einem inversen ebenen Pendel als Aufbau präsentiert. Das Pendel besitzt zwei aktive Gelenke und ist durch ein passives Gelenk an der Radachse mit den Rädern verbunden. Die Räder sind parallel angeordnet und durch eine Querachse verbunden. Die Bewegung des aktiven Teils des Pendels beeinflusst im großen Maße die Stabilität der Bewegung des mobilen Roboters. In den Publikationen werden Pendelbewegungen in der Weise angepasst, dass der Roboter schwingungsfrei

Zielpositionen im Raum anfahren kann. Da ein stabiles Verfahren eines auf Rädern balancierenden Roboters eine große Herausforderung ist, wird der mobile Aufbau dazu benutzt Bewegungsabläufe zu stabilisieren.

In [40] und [45] werden Zwei-Rad-Roboter mit einem Roboterarm als Aufbau untersucht. Durch einen sehr hohen Schwerpunkt können die Roboter schon durch leichte Kollisionen mit der Umgebung umfallen. Aus diesem Grund werden in diesen Publikationen Ausweichstrategien des Roboterarms entwickelt. Dabei trägt der Roboterarm einen Kraftsensor mit dem die äußere Kraft gemessen wird. Aus dem Betrag und der Richtung der Kraft wird ein Ausweichmanöver für den Arm berechnet.

3.5. Fazit

Der vorgestellte Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zeigt ein breit gefächertes Spektrum an Anwendungen und daraus entwickelten Methoden diese zu kontrollieren. Es konnte jedoch kein einheitliches Vorgehen zur Behandlung von dynamischen Systemen gefunden werden.

In dieser Arbeit wird ein universelles Konzept herausgearbeitet, mit dem dynamische Transportvorgänge aus der industriellen Robotik schnell und einheitlich mathematisch erfasst und geregelt werden können. Das Konzept gibt klare Richtlinien bei der Aufstellung des physikalischen Modells, der Ableitung der Bewegungsgleichungen und des Reglers und vereinfacht damit die Beschreibung des Systems. Die Universalität des Vorgehens wird an fünf unterschiedlichen dynamischen Transportsystemen gezeigt.

4. Pendel - eine hängende Last

Der Transport von hängenden Lasten ist beliebt und verbreitet. Er erlaubt eine flexible und schnelle Positionierung von Lasten im dreidimensionalen Raum auf große Entfernungen. Man denke dabei an riesige Containerumschlagsplätze, wo tausende von Containern in sehr kurzer Zeit bewegt werden. Ein schneller Transport ist dabei ein wichtiger Kostenfaktor.

An jeder größeren Baustelle stehen heutzutage Baukräne, welche die Arbeit von Bauarbeitern enorm erleichtern und dadurch die Produktivität steigern. Das Steuern einer Krananlage erfordert nicht nur ein gewisses Grundverständnis, sondern auch viel Gefühl und Erfahrung. Ein Gegensteuern bei einer aufkommenden Schwingung, begünstigt vielleicht durch schnelle Beschleunigungen und äußere Einflüsse, ist schwierig und nicht intuitiv. Gefährliche Situationen können plötzlich entstehen und je nach Einsatzgebiet kann ein Schaden am Material die Folge sein oder Menschen verletzt werden.

Das Ziel dieses Kapitels ist das dynamische System Pendel zu verstehen, mathematisch zu erfassen und einen kontrollierten Transport zu ermöglichen.

4.1. Aufbau des physikalischen Modells

Abbildung 4.1 zeigt ein physikalisches Modell eines mathematischen Pendels. Das Modell besteht aus einem raumfesten Koordinatensystem (KS) (x,y,z) , in dem sich eine große Masse M mit dem Ortsvektor \mathbf{x} als Aufhängepunkt einer kleineren hängenden Masse m mit dem Ortsvektor \mathbf{x}' bewegt. Die Bewegung der kleinen Masse m wird im blau gezeichneten KS (α,β,γ) beschrieben. Diese kann sich auf einer gedachten Kugelschale mit einem festen Radius um die Masse M beliebig bewegen. Die Masse M steht für einen, im Vergleich zur kleinen Masse m , schweren Manipulator. Die Form und die Bauart des Manipulators interessieren hier nicht und können später beliebig gewählt werden. Die kleine Masse m beschreibt eine zu transportierende Last, die durch die Bewegung des Aufhängepunkts in einen beliebigen Raumpunkt transportiert werden kann. Das blau markierte KS ändert seine Ausrichtung bzgl. des raumfesten KS nicht, nur der Ursprung kann als Aufhängepunkt des Pendels frei verschoben werden. Die Erdbeschleunigung g zeigt in die Richtung der Achse γ , l bezeichnet die Länge des Pendels.

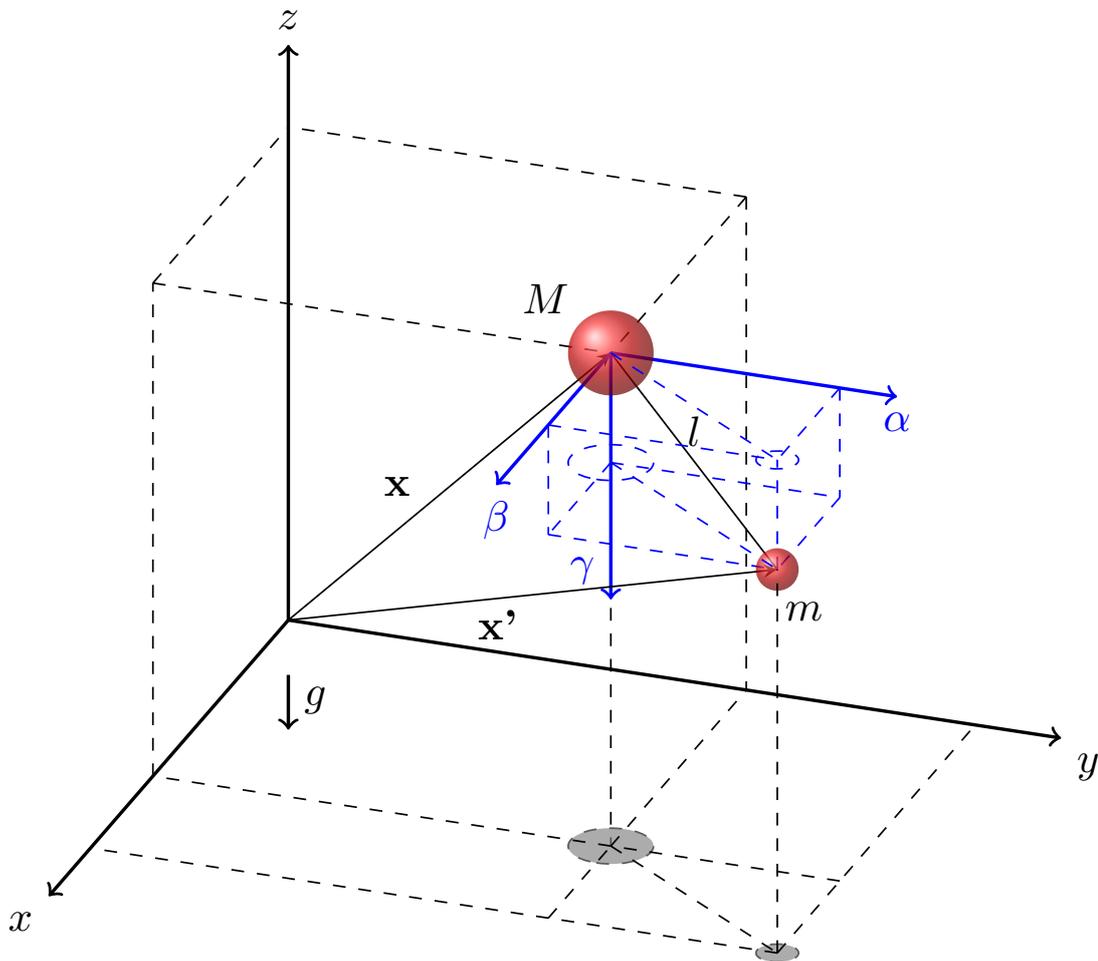


Abbildung 4.1.: Physikalisches Modell einer hängenden zu transportierenden Last - ein Pendel mit beweglichem Aufhängepunkt

4.2. Ableitung der Bewegungsgleichungen

Auf der Basis des physikalischen Modells werden in diesem Abschnitt die Bewegungsgleichungen nach dem Lagrange'schen Prinzip der klassischen Mechanik abgeleitet. Äußere Kräfte werden der Einfachheit wegen nicht betrachtet (vgl. [51], Kapitel 3).

Zunächst wird die Lagrangefunktion L des Systems aufgestellt. Diese setzt sich als Summe aus der kinetischen Energie T und der negativen potentiellen Energie V

zusammen

$$L = T - V \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} &= \underbrace{\frac{1}{2}M\dot{\mathbf{x}}^2 + \frac{1}{2}m\dot{\mathbf{x}}'^2}_T \underbrace{-Mgz - mgz'}_{-V} \\ &= \frac{1}{2}M(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2}m((\dot{x} + \dot{\beta})^2 + (\dot{y} + \dot{\alpha})^2 + (\dot{z} - \dot{\gamma})^2) \\ &\quad - Mgz - mg(z - \gamma). \end{aligned} \quad (4.2)$$

Da die Pendellänge l als fest angenommen wird, kann γ aus der Gleichung (4.2) mit Hilfe der folgenden Beziehungen

$$\gamma = \pm\sqrt{l^2 - \alpha^2 - \beta^2} \quad (4.3)$$

bzw.

$$\dot{\gamma} = \mp \frac{\alpha\dot{\alpha} + \beta\dot{\beta}}{\sqrt{l^2 - \alpha^2 - \beta^2}} \quad (4.4)$$

eliminiert werden. (4.4) bildet die erste Ableitung von (4.3) nach der Zeit. g ist die Erdbeschleunigung und l die Länge des Pendels (vgl. Abbildung 4.1).

Beschränkt man die Betrachtung des Pendels auf positive γ , d. h. das Pendel bleibt im blau gezeichneten KS immer unterhalb der α/β -Ebene und überschlägt sich nicht, dann gilt in (4.3) und (4.4) das obere Vorzeichen. Will man negative γ zulassen, muss eine Fallunterscheidung gemacht werden. Da hier das Ziel ein schwingungsfreier Transport des Pendels ist, wird auf eine Fallunterscheidung verzichtet und γ als positiv angenommen.

Als nächstes werden nach der Vorschrift (vgl. [51], Kapitel 3)

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \quad (4.5)$$

mit $q_1 = \alpha$ und $q_2 = \beta$ die Bewegungsgleichungen für α und β abgeleitet

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} = & -\frac{1}{\gamma^2 l^2} \left(2\alpha^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \dot{\beta} - \alpha \dot{\alpha}^2 \dot{\beta}^2 - \alpha^3 \dot{\beta}^2 + \alpha \dot{\beta}^2 l^2 + \alpha \dot{\alpha}^2 l^2 + \alpha \gamma^3 g \right. \\ & \left. + \alpha \beta^3 \ddot{x} + \alpha^3 \beta \ddot{x} - \alpha \beta l^2 \ddot{x} + \alpha^4 \ddot{y} + \alpha^2 \beta^2 \ddot{y} - \beta^2 l^2 \ddot{y} - 2\alpha^2 l^2 \ddot{y} + l^4 \ddot{y} + \alpha \gamma^3 \ddot{z} \right), \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\beta} = & -\frac{1}{\gamma^2 l^2} \left(2\beta^2 \dot{\beta} \dot{\alpha} \dot{\alpha} - \beta \dot{\beta}^2 \dot{\alpha}^2 - \beta^3 \dot{\alpha}^2 + \beta \dot{\alpha}^2 l^2 + \beta \dot{\beta}^2 l^2 + \beta \gamma^3 g \right. \\ & \left. + \beta \alpha^3 \ddot{y} + \beta^3 \alpha \ddot{y} - \beta \alpha l^2 \ddot{y} + \beta^4 \ddot{x} + \beta^2 \alpha^2 \ddot{x} - \alpha^2 l^2 \ddot{x} - 2\beta^2 l^2 \ddot{x} + l^4 \ddot{x} + \beta \gamma^3 \ddot{z} \right). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Da die Raumrichtungen α und β aus Symmetriegründen völlig gleichberechtigt sind, geht die Bewegungsgleichung (4.6) in (4.7) über, indem man α und β bzw. x und y und

ihre Ableitungen nach der Zeit vertauscht. Selbstverständlich liefert die Anwendung der Vorschrift (4.5) mit $q_2 = \beta$ das gleiche Ergebnis.

Die Wirkung des Luftwiderstandes wird hier als vernachlässigbar klein angenommen und bei der Ableitung der Bewegungsgleichungen außer Acht gelassen.

Die DGL (4.6) und (4.7) beschreiben die Beschleunigung des Pendelkörpers in Abhängigkeit von seinem momentanen Zustand und der Beschleunigung des Aufhängepunkts. Diese Beziehungen sind ausreichend, um daraus einen Zustandsregler für dieses System abzuleiten.

4.3. Mathematische Ableitung eines Riccati-Reglers

Ausgehend von den abgeleiteten Bewegungsgleichungen (4.6) und (4.7) wird in diesem Abschnitt ein Regler auf der Basis der vollständigen Zustandsrückführung für das dynamische System aus Abbildung 4.1 abgeleitet. Da für alle Szenarien in dieser Arbeit der gleiche Regler verwendet wird, wird der mathematische Formalismus hier etwas genauer behandelt und in späteren Kapiteln nur die Ergebnisse der Berechnungen und die systemspezifischen Besonderheiten vorgestellt.

Zunächst werden alle Größen, die zu einer eindeutigen Beschreibung des Systems nötig sind, zu einem Vektor

$$\mathbf{x} = (\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z})^T \quad (4.8)$$

zusammengefasst, dem sogenannten *Zustandsvektor* des Systems. Die Bezeichnungen der Elemente des Zustandsvektors beziehen sich auf die Abbildung 4.1: die ersten vier Elemente beschreiben die Bewegung des Pendelkörpers, die letzten sechs die Bewegung des Aufhängepunkts. Mit (4.8) lässt sich das dynamische System des Pendels in folgender Form schreiben

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u}(t). \quad (4.9)$$

In dieser Darstellung ist \mathbf{A} die *Systemmatrix* (10×10), \mathbf{B} die *Eingangsmatrix* (10×3) und $\mathbf{u} = (\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})^T$ der Steuervektor der Regelung. Durch einen Vergleich mit (4.6) und (4.7) wird klar, dass die Darstellung der Matrix \mathbf{A} nicht eindeutig ist. Als eine

mögliche Darstellung für \mathbf{A} kann

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

mit

$$A_{21} = -\frac{1}{\gamma^2 l^2} (2\alpha\dot{\alpha}\beta\dot{\beta} - \dot{\alpha}^2\beta^2 - \alpha^2\dot{\beta}^2 + \dot{\beta}^2 l^2 + \dot{\alpha}^2 l^2 + \gamma^3 g) \quad (4.11)$$

gewählt werden. A_{43} geht aus (4.11) durch Vertauschen der Größen α und β hervor. Die Darstellung von \mathbf{B} ist in dem vorliegenden Fall eindeutig (vgl. (4.6) und (4.7)).

Die Behandlung dieses nichtlinearen zeitabhängigen Systems (4.9) ist möglich, aber wie am Ende dieses Abschnitts diskutiert wird, unnötig kompliziert und die damit berechnete Regelung nicht immer echtzeitfähig. Deshalb werden die Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} an einem Arbeitspunkt \mathbf{x}_0 entwickelt. Im Falle des Pendels ist die Wahl eindeutig. Die Besonderheiten anderer Systeme und die damit verbundene Wahl des Entwicklungspunkts wird in Kapiteln 6 und 9 diskutiert. Beim Pendel liegt es nahe den Ruhepunkt des Pendels (mit allen Geschwindigkeiten gleich Null) als Arbeitspunkt zu wählen

$$\mathbf{x}_0 = (\alpha = 0, \dot{\alpha} = 0, \beta = 0, \dot{\beta} = 0, x = 0, \dot{x} = 0, y = 0, \dot{y} = 0, z = 0, \dot{z} = 0)^T. \quad (4.12)$$

Nach [30], Kapitel 3 lassen sich nun die Matrizen in folgender Weise entwickeln

$$\mathbf{A}_0 = \frac{\partial \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0}, \quad (4.13)$$

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0}. \quad (4.14)$$

Durch Einsetzen von (4.12) in (4.11) werden die Elemente A_{21} und A_{43} zu

$$A_{21} = A_{43} = -\frac{g}{l}. \quad (4.15)$$

Wie leicht nachgerechnet werden kann, wird \mathbf{B} zu

$$\mathbf{B}_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.16)$$

Dieses im Vergleich zu (4.9) sehr einfaches lineares zeitunabhängiges System lässt sich leicht behandeln.

Zur Klassifizierung des Systems nach [31], Kapitel 13 werden für $l = 1 \text{ m}$ und $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ die Eigenwerte berechnet und die Eigenwertkonfiguration (EWK) in Abbildung 4.2 (a) skizziert. Die abgebildete Konfiguration charakterisiert ein ungedämpftes Oszillationsverhalten: die Eigenwerte $\lambda_{1,3}$ und $\lambda_{2,4}$ entsprechen ungedämpften Schwingungen in α - und β -Richtungen und der sechsfache Eigenwert $\lambda_{5,\dots,10}$ entspricht der Bewegung des Aufhängepunkts in drei Raumrichtungen.

Der Regler wird nun nach dem Prinzip der vollständigen Zustandsrückführung berechnet. Abbildung 4.3 zeigt eine Skizze des geregelten Systems. Auf die Systemmatrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} ist bereits eingegangen worden. Diese können von der Zeit abhängen wie in (4.9) oder wie \mathbf{A}_0 oder \mathbf{B}_0 zeitunabhängig sein. \mathbf{I} integriert $\dot{\mathbf{x}}$ bezüglich der Zeit und stellt damit den Integrator dar. Die Rückführungsmatrix \mathbf{K} und die Vorfiltermatrix \mathbf{V} bilden den Regler und werden im Folgenden noch erklärt und berechnet. \mathbf{C} ist die Ausgangsmatrix, die der Berechnung der Regelgröße $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}$ dient. Für das System Pendel ist die Regelgröße $\mathbf{y} = (x, y, z)^T$. Somit ergibt sich für die Matrix

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4.17)$$

Die Zustände $(x, y, z)^T$ können mit Hilfe von \mathbf{V} vorgegeben und das Pendel damit im Raum transportiert werden. $\mathbf{p} = (x_{neu}, y_{neu}, z_{neu})^T$ bezeichnet die Vorgabe einer neuen Position und \mathbf{u}_v bildet als Summand einen Teil des Steuersignals \mathbf{u} . Der zweite Summand \mathbf{u}_k wird, wie aus der Skizze 4.3 zu erkennen ist, mit $\mathbf{u}_k = -\mathbf{K}\mathbf{x}$ berechnet. Die Matrix \mathbf{K} ist so zu bestimmen, dass das Signal \mathbf{u}_k die Zustände \mathbf{x} optimal zu Null regelt. Mit \mathbf{x}_s kann eine unbekannte Störung auf das System von außen berücksichtigt werden. Diese wird durch die Messung des Ausgangssignals \mathbf{x} des Systems erfasst.

In Kapitel 13 von [31] werden zwei Vorgehensweisen zur Berechnung der Matrix \mathbf{K} vorgestellt. Die erste Methode nennt sich 'Regelentwurf durch Polvorgabe'. Bei dieser

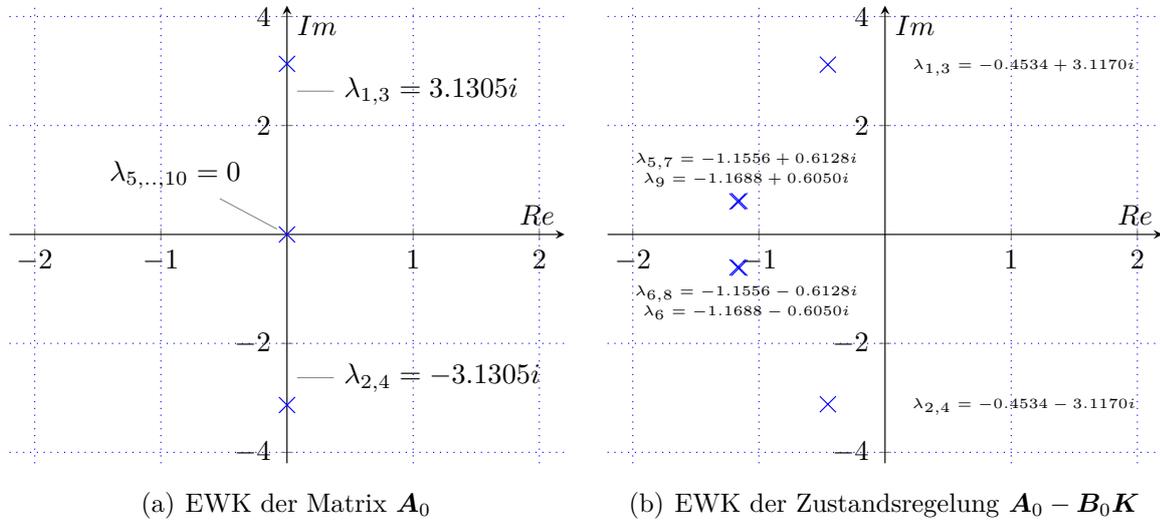


Abbildung 4.2.: EWK des Systems Pendel:

(a) EWK der Matrix A_0 des Systems Pendel mit frei beweglichem Aufhängepunkt ($l = 1$ m und $g = 9.8 \text{ m/s}^2$). Die Eigenwerte $\lambda_{1,3}$ und $\lambda_{2,4}$ entsprechen ungedämpften Schwingungen in Richtungen α und β und der sechsfache Eigenwert $\lambda_{5,\dots,10}$ entspricht der Bewegung des Aufhängepunkts in drei Raumrichtungen.

(b) EWK der Zustandsregelung $A_0 - B_0K$ mit den Gewichtungsmatrizen $Q = \text{diag}(50, 5, 50, 5, 30, 20, 30, 20, 30, 20)$ und $R = \text{diag}(10, 10, 10)$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ und $l = 1$ m. Sämtliche Eigenwerte $\lambda_{1,\dots,10}$ liegen links der imaginären Achse somit ist der berechnete Regler stabil.

Methode werden die n Eigenwerte der Zustandsregelung, d. h. der Matrix $A_0 - B_0K$ in der Weise gewählt, dass sie, vereinfacht gesagt, möglichst weit links der imaginären Achse liegen. Dies sichert die Stabilität des Reglers. Dieser Ansatz ergibt n Gleichungen, aus denen $p \cdot n$ Elemente der Matrix K zu bestimmen sind. p ist in diesem Fall die Dimension des Steuersignals (hier $p = 3$) und n die Dimension des dynamischen Systems (hier $n = 10$). In der Regel braucht man mehrere Berechnungsdurchläufe, um mit der berechneten Matrix ein optimales Ergebnis zu erzielen. Aus diesem Grund wird für den hier präsentierten Regler eine Methode verwendet, bei der die Berechnung einen direkteren Weg einschlägt.

Nach [31], Kapitel 13 ergibt sich die optimale Regelung

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{x} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (4.18)$$

der steuerbaren Strecke $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$ durch die eindeutig bestimmte positiv definite Matrix \mathbf{P} , welche die *Riccati-Gleichung*

$$\mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (4.19)$$

Nun werden die Matrizen \mathbf{V} und \mathbf{K} berechnet. Im Abschnitt 13.2 von [31] wird die Berechnung der Vorfiltermatrix \mathbf{V} behandelt. Das Ergebnis der Herleitung lautet schließlich

$$\mathbf{V} = [\mathbf{C}(\mathbf{BK} - \mathbf{A})^{-1}]^{-1}. \quad (4.22)$$

Die Berechnung von \mathbf{V} setzt die Kenntnis der Rückführungsmatrix \mathbf{K} voraus. Diese wird im weiteren Verlauf dieses Abschnitts berechnet. Die Wirkung von \mathbf{V} ist die, dass wenn sich der Führungsvektor \mathbf{p} sprunghaft ändert, die Regelgröße \mathbf{y} diesem möglichst schnell folgt, bis der Endwert $\mathbf{y} = \mathbf{p}$ schließlich erreicht wird. Damit lässt sich im Falle des Pendels eine neue Position des Aufhängepunkts vorgeben und das Pendel im Raum transportieren.

Zur Berechnung der Rückführungsmatrix \mathbf{K} ist es erforderlich die Riccati-Gleichung (4.19) zu lösen. MATLAB stellt zu diesem Zweck eine Funktion zur Verfügung

$$[\mathbf{K}, \mathbf{P}, \mathbf{e}] = \text{lqr}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{N}). \quad (4.23)$$

\mathbf{N} ist hier eine $(n \times p)$ -Matrix, die im quadratischen Gütemaß in (4.20) als weiterer Summand das gemischte Produkt aus \mathbf{x} und \mathbf{u} in der Form $\mathbf{x}^T \mathbf{N} \mathbf{u}$ gewichtet. Da sich die Gewichtung des gemischten Produkts einer anschaulichen Deutung entzieht und die Auswirkungen auf die Regelung nicht vorhersagbar sind, wird die Matrix $\mathbf{N} = \mathbf{0}$ gewählt.

Neben der Lösung der Riccati-Gleichung \mathbf{P} und der Rückführungsmatrix \mathbf{K} liefert die Funktion `lqr` (linear quadratic (state-feedback) regulator) auch die Eigenwerte der Zustandsregelung $\mathbf{e} = \text{eig}(\mathbf{A} - \mathbf{BK})$. Um die Stabilität des Reglers zu gewährleisten, müssen diese möglichst weit links der imaginären Achse liegen. Abbildung 4.2 (b) zeigt die EWK des berechneten Reglers $\mathbf{A}_0 - \mathbf{B}_0 \mathbf{K}$. Sämtliche Eigenwerte $\lambda_{1,\dots,10}$ liegen links der imaginären Achse. Diese Eigenschaft charakterisiert den berechneten Regler als stabil (vgl. [31], Kapitel 13). Das komplette MATLAB-Skript zur Berechnung des Reglers für das System Pendel befindet sich im Anhang A.1.

Da die Systemmatrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} nach der Entwicklung konstant sind (\mathbf{A}_0 , \mathbf{B}_0) und \mathbf{Q} und \mathbf{R} konstant gewählt werden, ist die Lösung der Riccati-Gleichung (4.19) \mathbf{P} und damit die Rückführungsmatrix \mathbf{K} (4.18) und die Vorfiltermatrix \mathbf{V} (4.22) ebenfalls unabhängig von der Zeit. Für den Regler in Abbildung 4.3 bedeutet das, dass die Reglermatrizen im Vorfeld berechnet werden und das Steuersignal als Vektorprodukt aus dem aktuellen Zustandsvektor \mathbf{x} und der konstanten Rückführungsmatrix \mathbf{K} in jedem Berechnungsschritt berechnet wird. Der Rechenaufwand ist dabei minimal.

Es wäre denkbar, die Reglermatrizen in jedem Berechnungsschritt der Regelung aus zeitabhängigen Systemmatrizen $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$ und $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ zu berechnen. Dazu muss in jedem Schritt die Riccati-Gleichung gelöst, die Steuerbarkeit des Systems getestet und die Reglermatrizen berechnet werden. Der Rechenaufwand steigt damit deutlich und macht eine Regelung in Echtzeit unmöglich. Deshalb ist die Linearisierung, wie sie in (4.13) und (4.14) durchgeführt wurde bei komplexen Systemen oft unumgänglich. In Simulationen, wie sie in den folgenden Abschnitten präsentiert werden, wurde die

hier beschriebene Vorgehensweise (ohne die Berechnung des Steuerbarkeitskriteriums) getestet. Da die Berechnung der physikalischen Seite der Simulation problemlos gehalten werden kann, stellt die längere Berechnung des Reglers kein Problem dar. Die Verbesserung der Performance von Transportvorgängen mit dem nicht-linearisierten Regler war so unwesentlich, dass auf die aufwendige Berechnung ohne Nachteile verzichtet werden kann.

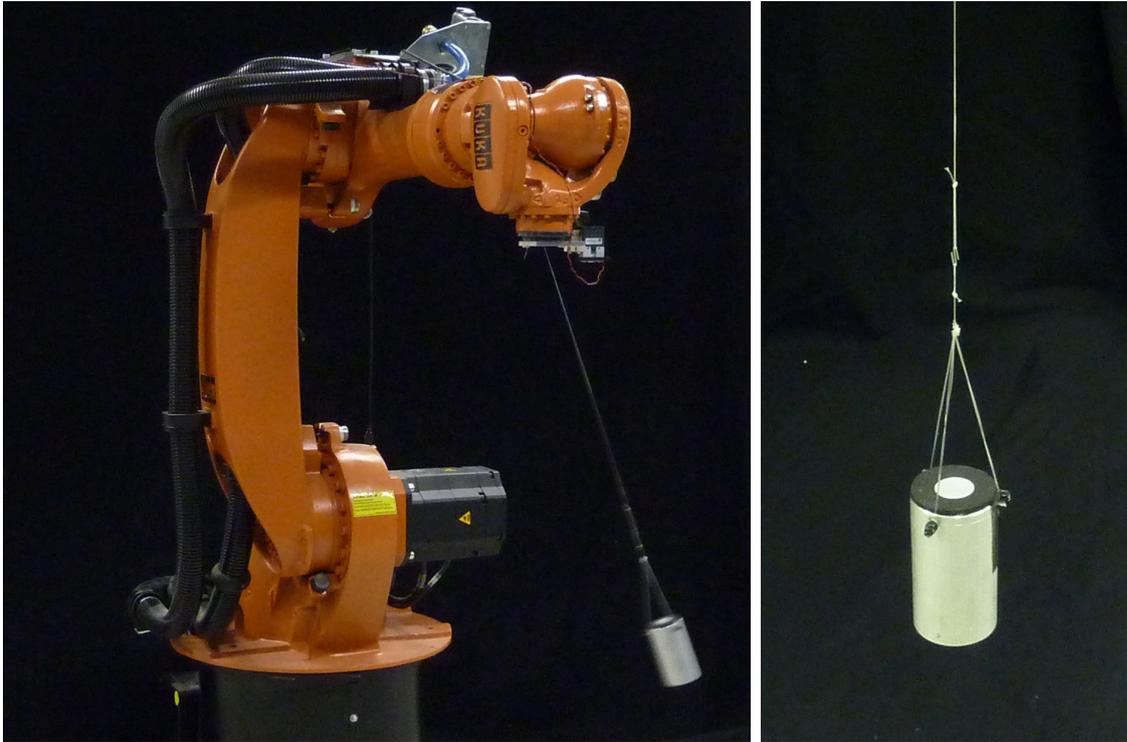
Der entscheidende Vorteil der Reglerberechnung mit der Lösung der Riccati-Gleichung mit Hilfe der MATLAB-Funktion `lqr` liegt darin, dass der Regler aus den Bewegungsgleichung auf direktem Wege abgeleitet werden kann. Die Berechnungsvorschriften sind sehr klar und erfordern kein tieferes Verständnis des Reglers. Beim Optimieren der Zustände durch die Gewichtungsmatrizen kann man, wenn auch nicht sehr direkt aber anschaulich, den Transportvorgang in gewünschter Weise beeinflussen. Einen Zustandsregler, der durch das Lösen der Riccati-Gleichung (4.19) berechnet wird, bezeichnet man im Allgemeinen als *Riccati-Regler*.

4.4. Experimenteller Aufbau

4.4.1. Roboter und Pendelaufhängung

Für den räumlichen Transport des Pendels wird ein Industrieroboter KR-16 der Firma KUKA benutzt. Dieser verfügt dank seiner sechs Achsen über sechs räumliche Freiheitsgrade und ist damit sehr flexibel. Seine dynamische Belastbarkeit liegt bei 16 kg (vgl. [43]). Der Aufbau ist in Abbildung 4.4 (a) und (b) zu sehen. Das Pendel besteht aus einem dünnen Nylonfaden und einem Aluminiumzylinder der Masse ca. 0.2 kg. Die Fadenlänge ist während der Versuche fest. In den hier präsentierten Versuchen wurde meistens mit einer Pendellänge von 0.6 m experimentiert.

Die Aufhängung des Pendels am Pendelkörper erfolgt an drei Punkten (vgl. Teilabbildung 4.4 (b)). Die Dreipunktaufhängung stabilisiert das Pendel gegen Schwingungen um den Schwerpunkt des Pendelkörpers. Diese Art von Schwingungen ist schwer wenn nicht ganz unmöglich zu regeln. Das Pendel wurde als Punktmasse modelliert, so dass diese Schwingung im Modell nicht auftreten kann. Knapp über dem Punkt, in dem die drei Fäden zu einem zusammenlaufen, ist ein kleiner S-Haken angebracht. Dieser erlaubt ein schnelles Austauschen des Pendelkörpers oder ein Verlängern des Fadens. Ganz deutlich zu erkennen ist der Reflektor auf der Oberseite des Pendelkörpers. Wie im weiteren Verlauf beschrieben wird, dient er zusammen mit einer Infrarot-LED (IR-LED) und einem Tageslichtfilter der Vereinfachung der Bildbearbeitung zur Positions- und Geschwindigkeitsschätzung.



(a) Roboter KUKA KR-16 mit einem Pendel als hängende Last (b) Pendelkörper mit Reflektor

Abbildung 4.4.: (a) Industrieroboter KUKA KR-16 beim Transport eines Pendels als hängende Last

(b) Alu-Zylinder als Pendelkörper an einem dünnen Nylonfaden. Deutlich zu sehen ist der Reflektor auf der Oberseite des Pendelkörpers. Die Aufhängung des Pendelkörpers erfolgt aus Stabilitätsgründen an drei Punkten. Knapp oberhalb der Dreipunktaufhängung ist ein S-Haken zum schnellen Wechseln des Pendelkörpers oder zum Verlängern des Fadens angebracht.

4.4.2. Optischer Sensor und Bildbearbeitung

Wie in Abbildung 4.5 (a) zu sehen ist, wird der Pendelkörper mit einer am Tool-Center-Point (TCP) befestigten USB-Kamera beobachtet, um die für den Regler benötigte Position und Geschwindigkeit des Pendels abzuschätzen. Die zusätzliche Verwendung einer IR-LED und eines Reflektors auf der Oberseite des Pendelkörpers machen die Pendelbeobachtung unabhängig von Lichtverhältnissen. Dazu wurde vor dem CCD-Chip der Kamera ein optischer Filter eingesetzt, der Tageslicht und Licht anderer Lichtquellen im sichtbaren Bereich blockiert. Die Wahl der Kamera ist auf eine monochrome USB-Kamera der Firma uEye mit einem $1/3''$ CCD-Sensor (1024×768 Pixel) und eine LED mit der maximalen Intensität bei $\lambda_{peak} = 850$ nm gefallen. In diesem Bereich ist die Empfindlichkeit der Kamera am höchsten. Die LED ist an einem Kühl-

4. Pendel - eine hängende Last

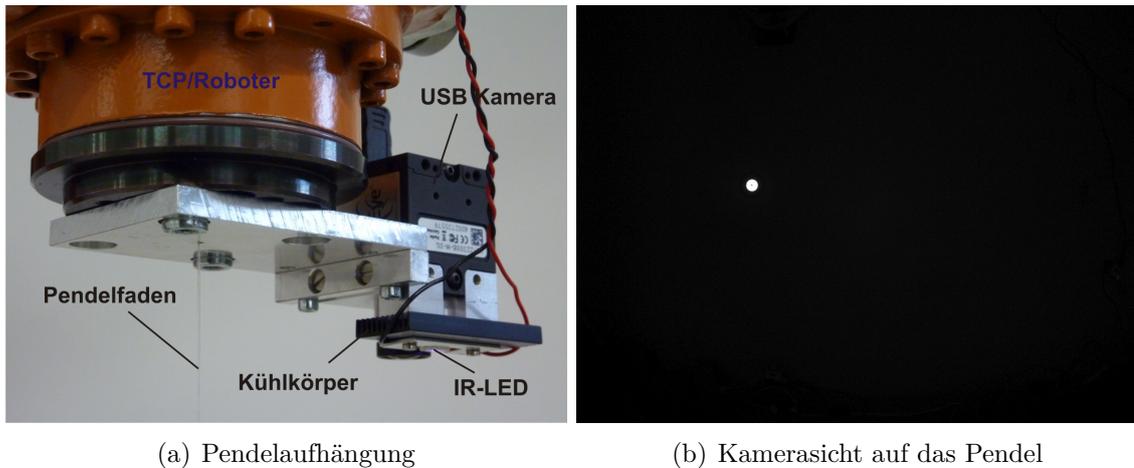


Abbildung 4.5.: (a) zeigt eine Nahaufnahme der Pendelaufhängung. Am TCP des Roboters ist eine Alu-Platte angebracht, die einerseits als Aufhängung für das Pendel und andererseits als Halterung für die Kamera und die IR-LED dient.

(b) Eine Aufnahme der observierenden Kamera: ein heller Fleck auf schwarzem Hintergrund verrät die Position des Pendels im KS des Aufhängepunkts. Das Bild zeigt eine unbearbeitete Aufnahme der Kamera. Der Mittelpunkt des Reflexes wird nach dem Schwellwertverfahren ermittelt.

körper direkt neben der Kamera und damit neben dem Aufhängepunkt angebracht und strahlt nach unten in Richtung des Pendelkörpers. Das für das menschliche Auge unsichtbare Licht wird von einem auf der Oberseite des Pendelkörpers angebrachten flachen Reflektor zurückgeworfen und erzeugt auf einer unterbelichteten Aufnahme einen hellen Fleck. Dieser ist mit Methoden der Bildbearbeitung einfach zu finden. Abbildung 4.5 (b) zeigt eine Momentaufnahme der Pendelobservation.

Der reibungslose und schnelle Ablauf der Bildbearbeitung ist ein wichtiger Faktor der gesamten Regelung. Deshalb wurde ihre Berechnung auf einen zusätzlichen externen Rechner ausgelagert (Intel® Core™ 2 Quad CPU, Q8400 @ 2.66 Hz, 2 GB RAM). Auf diesem läuft eine am IPR entwickelte Applikation, die es ermöglicht verschiedene Filter zum Bildbearbeitungsprozess hinzuzufügen. Für das Experiment mit dem Pendel wurde ein Filter implementiert, der die Bilder zunächst entzerrt und mit Hilfe des einfachen Schwellwertverfahrens den Mittelpunkt des Reflektors im Bild berechnet. Über den Strahlensatz und mit der Voraussetzung, dass die Länge bekannt ist, wird die Position des Pendels bezüglich des Aufhängepunkts α und β bestimmt. Da die Zeit zwischen zwei Aufnahmen bekannt ist, können die Geschwindigkeiten $\dot{\alpha}$ und $\dot{\beta}$ abgeschätzt werden. Die hier beschriebene Applikation bedient sich der Standardfunktionen von OpenCV [66], einer offenen Programmbibliothek für Bildbearbeitung. Sie bearbeitet bei voller Auflösung 30 Bilder pro Sekunde. Der Output des Filters ist ein vierdimensionaler Vektor $(\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta})^T$.

Die fehlenden Daten für den vollständigen Zustandsvektor x , y und z werden in jedem Berechnungsschritt aus der Robotersteuerung ausgelesen und die dazugehörigen Geschwindigkeiten mit der Taktzeit von 12 ms bestimmt. Damit steht der vollständige Zustandsvektor $\mathbf{x} = (\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z})^T$ als Input für den Regler zur Verfügung.

4.4.3. Struktur des Datenaustauschs und der Regelung

In Abbildung 4.6 findet man eine Skizze des gesamten Versuchsaufbaus. Wie bereits erwähnt, ist der Bildbearbeitungsprozess auf einen externen Windows-Rechner ausgelagert, um eine schnelle und frequente Bearbeitung der aufgenommenen Bilder zu gewährleisten. Die Kamera ist über eine USB-Verbindung direkt an den Rechner angeschlossen. Der Output des Filters wird über ein Haus-Netzwerk via UDP an den Regler geschickt. Der Controller läuft auf einem echtzeitfähigem Linux-PC (Intel® Core™ 2 CPU 6400 @ 2.13GHz x 2, 2.0 GB RAM), der über ein Echtzeit-Netzwerk eine ständige TCP/IP-Verbindung mit dem Roboter-PC unterhält. Bei dieser Kommunikation wird die sogenannte KUKA-Ethernet-RSI-XML-Technologie [42] verwendet (RSI = **R**obot-**S**ensor-**I**nterface). Diese Technologie erlaubt es dem Roboter-PC, der in dieser Kommunikation als ein Client fungiert, mit einem Server über ein Netzwerk XML-Pakete auszutauschen. Der Roboter sendet in einem Takt von 12 ms eine Anfrage mit seiner aktuellen Position an den Server und bekommt innerhalb von 10 ms eine Antwort mit einer neuen Positionsvorgabe, ebenfalls als XML-Paket verpackt, zurück. Die interne Robotersteuerung versucht die vorgegebene Position im nächsten Interpolationstakt (IPO-Takt) zu erreichen. Alle internen Glättungsfilter der Robotersteuerung werden ausgeschaltet, um eine möglichst direkte Steuerung des Manipulators zu erreichen. Die Voraussetzung dafür ist eine optimale Vorgabe der Position durch den Regler, um eine flüssige Bewegung des Roboters zu gewährleisten.

OROCOS steht für **O**pen **R**obot **C**ontrol **S**oftware und ist ein Open-Source-Projekt aus mehreren C/C++-Bibliotheken (KDL, RTT usw., vgl. [65]). Es ermöglicht den Aufbau des in Abbildung 4.7 dargestellten Echtzeitkontrollsystems. Damit lassen sich reale Objekte innerhalb des Softwareprojekts als OROCOS-Objekte, in der Abbildung mit dem Anfangsbuchstaben 'O' gekennzeichnet, abbilden und durch gleichnamige Read/Write-Ports miteinander verbinden. Als Schnittstellen zur realen Welt dienen TCP/IP- oder UDP-Ports, die eine Netzwerkverbindung zwischen dem realen und dem virtuellen Objekt ermöglichen. Dieser modulare Aufbau ermöglicht es, einzelne Objekte des Systems durch andere problemlos auszutauschen. Z. B. kann bei Bedarf ein anderer Regler eingesetzt werden oder wie in der Abbildung angedeutet durch einen Block ersetzt werden, der mit einem externen Controller z. B. in MATLAB oder in Simulink kommuniziert. In der Praxis hat sich aber ein in C/C++ implementierter Regler bewährt, der aus dem entwickelten Simulink-Modell in C/C++ übertragen wurde.

4. Pendel - eine hängende Last

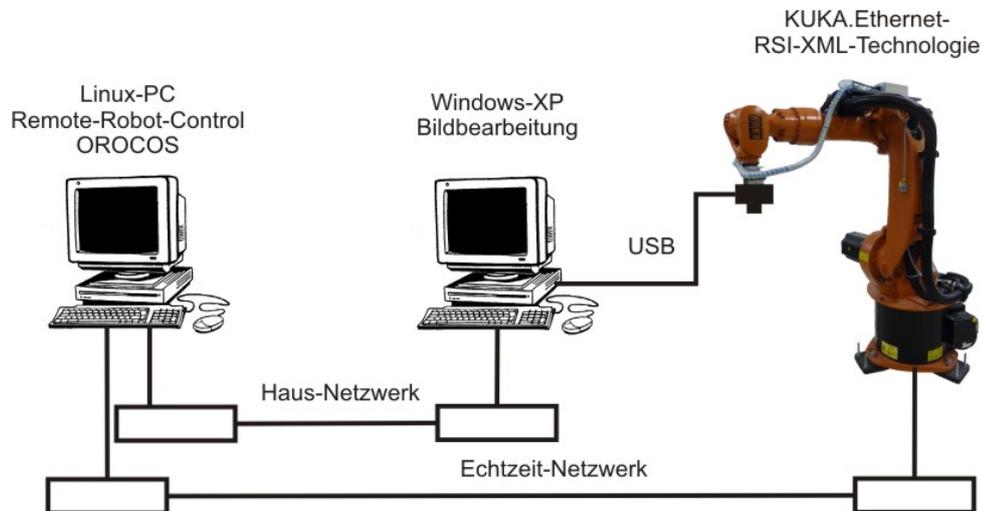


Abbildung 4.6.: Skizze des gesamten Versuchsaufbaus. Die Bildbearbeitung ist auf einen externen Rechner ausgelagert, an den die Observierungskamera über USB angeschlossen ist. Der vierdimensionale Output der Bildbearbeitung wird via UDP über ein Haus-Netzwerk an den Controller geschickt, der auf einem echtzeitfähigem Linux-PC läuft. Dieser bekommt die fehlenden Daten des Zustandsvektors über die Lage des Aufhängepunkts direkt von der Robotersteuerung. In jedem IPO-Takt sendet der Regler eine neue Position des Aufhängepunkts über ein Echtzeit-Netzwerk via TCP/IP an den Roboter. Dieser versucht innerhalb des nächsten IPO-Takts diese einzunehmen.

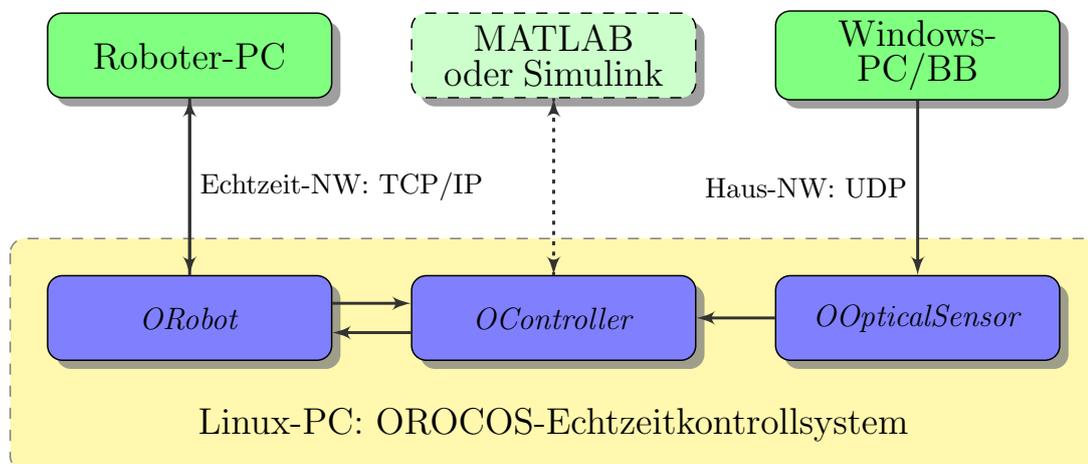


Abbildung 4.7.: Interne Softwarestruktur des Echtzeitreglers (gelb unterlegt): reale Objekte wie der Roboter und der optische Sensor werden als OROCOS-Objekte im Reglersystem abgebildet und über gleichnamige Read/Write-Ports miteinander verbunden. Nach außen kommunizieren die virtuellen Objekte via TCP/IP- oder UDP mit ihren realen Pendanten. Der Controller selbst ist in C/C++ implementiert, kann aber durch ein entsprechendes OROCOS-Objekt ersetzt werden, das eine Verbindung zu einem externen Rechner sicher stellt.

4.5. Simulationen und Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt wird das Modell 4.1 und der oben vorgestellte Regler simuliert. Die Simulation erfolgt in zwei Schritten:

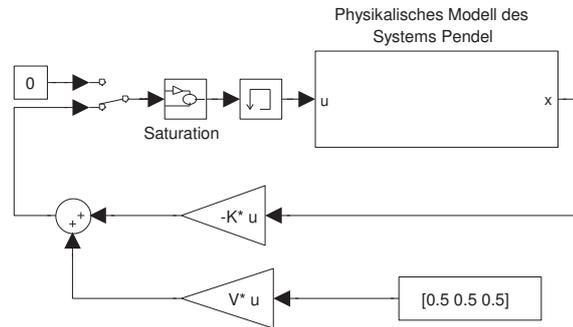
- In Abschnitt 4.5.1 wird die mathematische Richtigkeit des oben berechneten Reglers in seiner allgemeinen Form geprüft und seine Wirkung auf das physikalische Modell getestet. Dieser Simulation liegt nur das physikalische Modell (Abbildung 4.1) bzw. die daraus abgeleiteten Bewegungsgleichungen (4.6), (4.7) und der oben berechnete Regler zugrunde. Die Simulation erfolgt vollständig in Simulink.
- In Abschnitt 4.5.2 wird getestet, wie gut das physikalische Modell in Abbildung 4.1 die Wirklichkeit beschreibt. In dieser Simulation werden mit Hilfe einer Physik-Engine Bullet die Stabilisierung und der Transport eines frei hängenden Massenkörpers simuliert.

4.5.1. Modellsimulation in Simulink

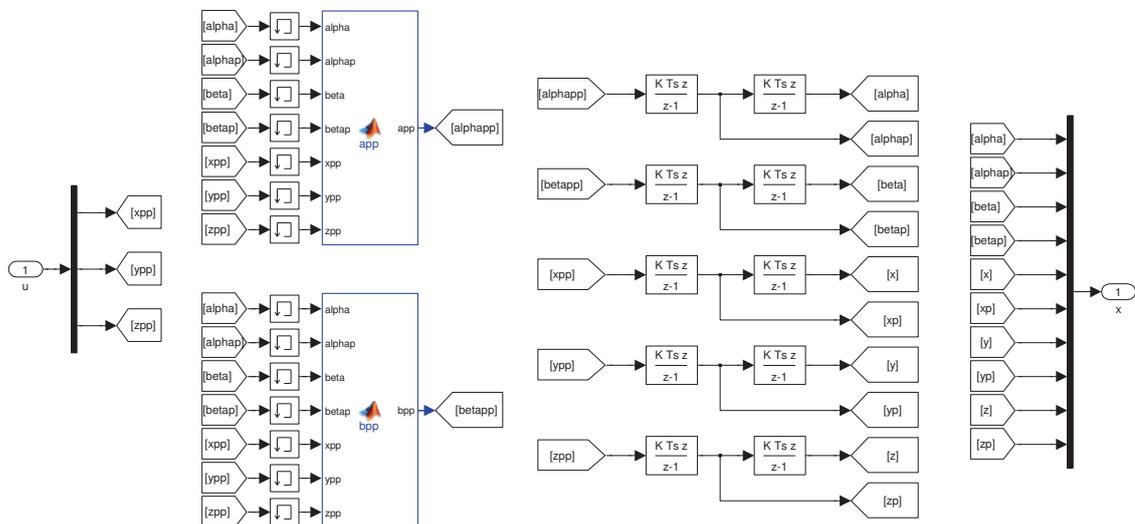
Abbildung 4.8 zeigt eine Darstellung des physikalischen Systems aus Abschnitt 4.1 und des in Abschnitt 4.3 abgeleiteten Zustandsreglers als Simulink-Modell. Die Darstellung besteht aus zwei Teilen: dem Regler, welcher in Abbildung 4.8 (a) gezeigt ist und dem Untersystem 'Physikalisches Modell des Systems Pendel', das in 4.8 (b) zu finden ist. Die Bestandteile des Reglers sind die Rückführungsmatrix \mathbf{K} , die Vorfiltermatrix \mathbf{V} , ein manueller Schalter, der das physikalische System vom Regler abkoppelt, ein 'Saturation'-Block, der das Steuersignal \mathbf{u} ab einem festgelegten Schwellwert begrenzt und ein 'Memory'-Block, der wegen der geschlossenen Rückführungsform des Reglers die Werte aus dem vorhergehenden Berechnungsschritt für die nachfolgende Berechnung zwischenspeichert. In Abbildung 4.8 (b) ist der Inhalt des System-Blocks abgebildet. Den Eingang bildet das Steuersignal \mathbf{u} . Die blau markierten Blöcke entsprechen den Bewegungsgleichungen (4.6) und (4.7). Die Abkürzungen 'app' bzw. 'bpp' stehen dabei für $\ddot{\alpha}$ bzw. $\ddot{\beta}$, sowie auch sonst stehen 'p' bzw. 'pp' (sprich: 'Punkt' bzw. 'Punkt-Punkt') am Ende einer Bezeichnung für die erste bzw. die zweite Ableitung der Größe nach der Zeit. Der mittlere Block integriert die Signale in zwei Schritten bezüglich der Zeit, so dass auf der rechten Seite der Zustandsvektor in der richtigen Reihenfolge das Ausgangssignal des Untersystems bildet. Das Modell wird von einem diskreten Solver mit einem Berechnungsschritt von 12 ms (IPO-Takt des Roboters) berechnet. Die Initialisierung der Integratoren erfolgt in demselben MATLAB-Skript (im Anhang A.1), in dem auch die Reglermatrizen für das System Pendel berechnet werden.

Die Abbildungen 4.9 und 4.10 zeigen Simulationsergebnisse aus drei verschiedenen Experimenten mit der gleichen Startbedingung: $\beta_0 = 0.3$ m und alle anderen Elemente

4. Pendel - eine hängende Last



(a) Zustandsregler als Simulink-Simulation

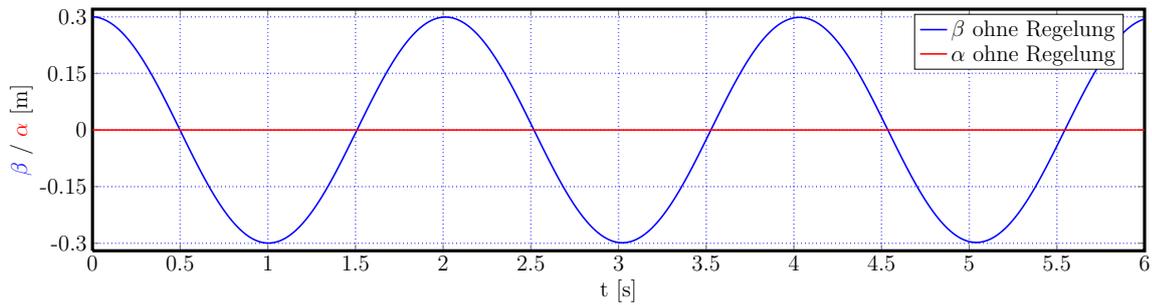
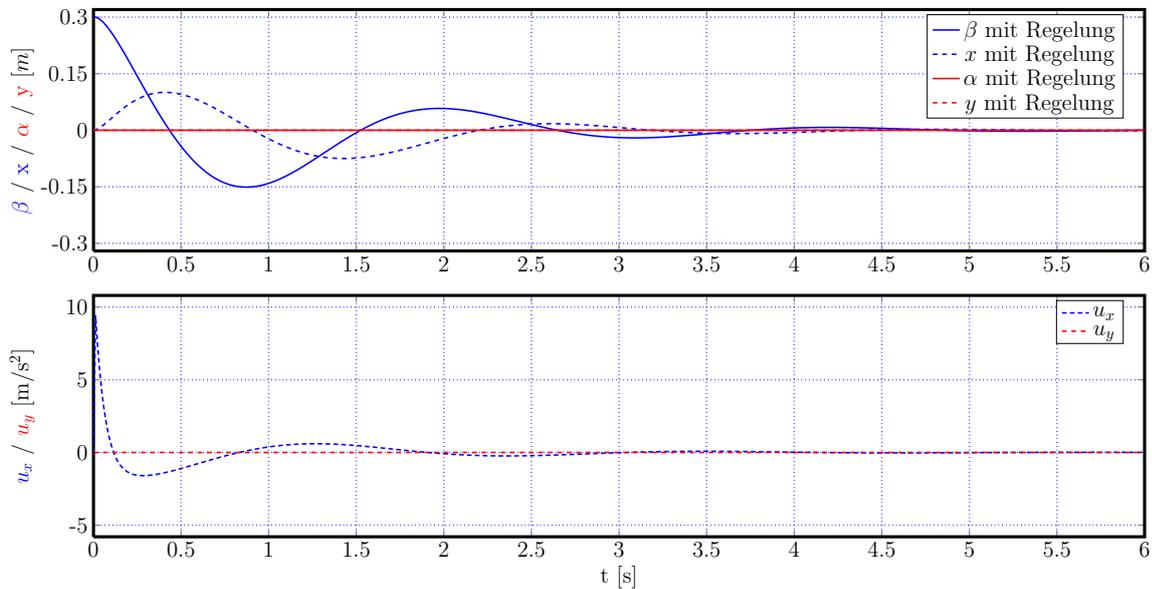


(b) Untersystem 'Physikalisches Modell'

Abbildung 4.8.: Simulationsmodell des Systems Pendel in Simulink:

(a) zeigt einen Zustandsregler bestehend aus der Rückführungsmatrix \mathbf{K} , der Vorfiltermatrix \mathbf{V} , einem manuellen Schalter, mit dem man die Wirkung des Reglers auf das System abschalten kann, einem 'Saturation'-Block, der das Steuersignal bei Überschreitung eines Schwellenwerts beschränkt, einem 'Memory'-Block, der in einem algebraischen Loop die Werte aus der vorhergehenden Berechnung speichert und dem Block des physikalischen Modells des Pendels.

(b) zeigt den Inhalt des Systemblocks 'Physikalisches Modell des Systems Pendel'. Den Eingang des Untersystems bildet der dreidimensionale Steuervektor \mathbf{u} . Blau eingerahmt folgen von links nach rechts die Bewegungsgleichungen (4.6) und (4.7). Der mittlere Block integriert die Signale in zwei Schritten bezüglich der Zeit, so dass man auf der rechten Seite den vollständigen Zustandsvektor in der richtigen Reihenfolge stehen hat, der den Ausgang des physikalischen Modells bildet.

(a) Ungedämpfte Schwingung in Richtung β ohne Regelung.

(b) Anfangssituation wie in (a), Schwingung wird ausgeglet.

Abbildung 4.9.: Ergebnisse einer Pendelsimulation in Simulink, Teil 1:

(a) zeigt eine ungedämpfte Schwingung in Richtung β , die durch eine Anfangsauslenkung $\beta_0 = 0.3\text{ m}$ angeregt wird. Der Regler ist vom physikalischen System abgekoppelt.

(b) zeigt den Vorgang der Schwingungsunterdrückung. Die Anfangssituation ist wie in (a). Im oberen Diagramm sind β , x , α und y aufgetragen. Die Anfangsauslenkung des Pendels löst wie erwartet ein Steuersignal in x -Richtung aus, das die Schwingung unterdrückt. Wichtig ist auch der untere Teil der Darstellung. Hier ist das Steuersignal $u_x = \ddot{x}$ und $u_y = \ddot{y}$ aufgetragen. Der Spitzenwert der Beschleunigung liegt bei $u_x \approx 10\text{ m/s}^2$ und muss dem jeweiligen Manipulator eventuell angepasst, d. h. beschränkt werden.

des Zustandsvektors \mathbf{x} gleich Null. Dies entspricht einer Anfangsauslenkung des Pendels in Richtung β . Abbildung 4.9 (a) zeigt eine ungedämpfte Schwingung in Richtung β . Die Auslenkung in Richtung α bleibt für die ganze Dauer des Versuchs bei null.

4. Pendel - eine hängende Last

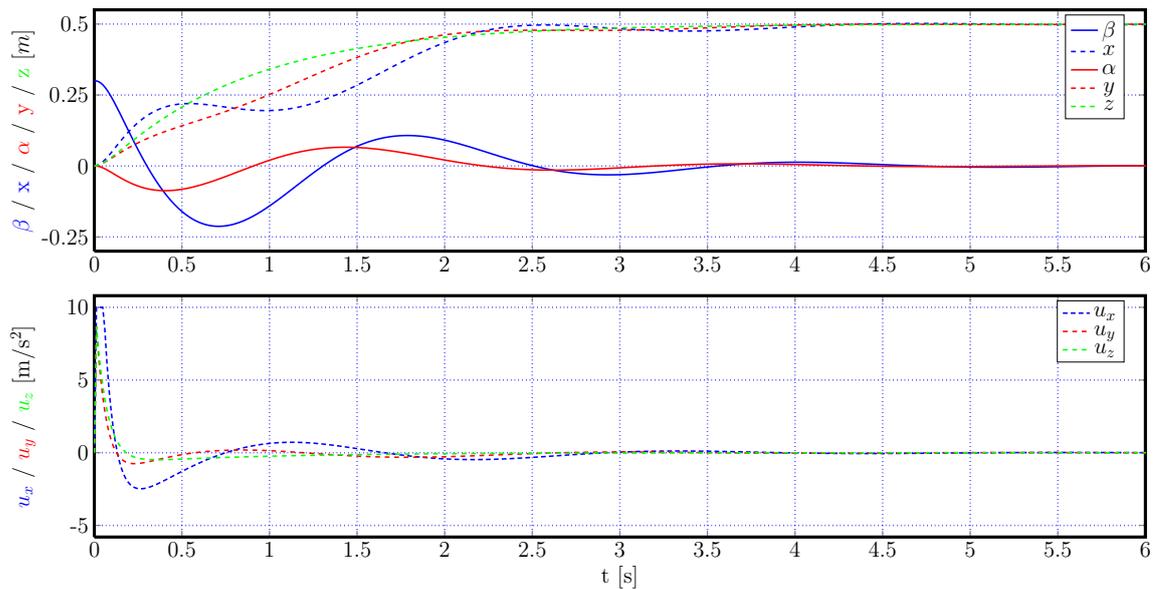


Abbildung 4.10.: Ergebnisse der Pendelsimulation in Simulink, Teil 2: Anfangssituation wie in Abbildung 4.9 (a), die Schwingung wird ausgeglet und das Pendel gleichzeitig in den Raumpunkt $(x = 0.5, y = 0.5, z = 0.5)^T$ m transportiert. Im oberen Diagramm sind β und α (durchgezogene Linien) und x , y und z (gestrichelt) aufgetragen. Das untere Diagramm zeigt den Verlauf des Steuersignals \mathbf{u} . Hier fällt auf, dass der Spitzenwert von u_x durch den 'Saturation'-Block abgeschnitten wird.

Der Regler ist bei diesem Versuch vom physikalischen System abgekoppelt und das System ist sich selbst überlassen. Der manuelle Schalter in Abbildung 4.8 befindet sich im oberen Zustand auf null.

In Abbildung 4.9 (b) wird der Vorgang der Schwingungsunterdrückung bei gleichen Anfangsbedingungen gezeigt. Hier hat die Anfangsauslenkung des Pendels in β -Richtung (blaue durchgezogene Linie) eine Reaktion des Reglers in x -Richtung (blau gestrichelt) zur Folge (vgl. Abbildung 4.1). Die Schwingung des Pendels wird innerhalb von ca. 3 s unterdrückt. Der untere Teil der Abbildung zeigt gestrichelt die entsprechenden Beschleunigungen $u_x = \ddot{x}$ (blau gestrichelt) und $u_y = \ddot{y}$ (rot gestrichelt) zu dem oberen Signal x und y . Der Spitzenwert der Beschleunigung liegt erwartungsgemäß bei der größten Auslenkung des Pendels bei knapp 10 m/s^2 und muss dem jeweiligen Manipulator angepasst werden, d. h. meistens beschränkt werden. Hier wurde der Schwellwert auf $a_{max} = 10 \text{ m/s}^2$ gesetzt (vgl. MATLAB-Skript im Anhang A.1). Eine Beschränkung des Steuersignals durch den 'Saturation'-Block im Simulink-Modell verlängert die Ausregelungszeit wenn der vom Regler vorgegebene Wert den Schwellwert überschreitet. Sie ist aber unumgänglich, weil das Steuersignal durch die Physik des mechanischen Manipulators beschränkt ist.

In Abbildung 4.10 ist eine Überlagerung aus einer Ausgleichsbewegung und einem

Transport des Pendels dargestellt. Die Anfangsbedingungen sind wieder die gleichen: $\beta_0 = 0.3\text{ m}$ und alle anderen Elemente des Zustandsvektors gleich Null. Der Transport des Pendels erfolgt aus dem Ursprung des Welt-KS in den Raumpunkt $(x = 0.5, y = 0.5, z = 0.5)^T\text{ m}$. Die Positionen des Aufhängepunkts $(x, y, z)^T$ sind gestrichelt eingezeichnet. Der Verlauf der Koordinate z (grün gestrichelt) ist sehr direkt, weil diese Bewegung die Schwingung des Pendels nur indirekt beeinflusst. In y (rot gestrichelt) ist eine leichte Ausgleichsbewegung erkennbar, weil durch den Transport in diese Richtung eine Schwingung in α -Richtung angeregt wird und ausgeglichen werden muss. Die Bewegung in x -Richtung ist aufgrund der Anfangsschwingung in Richtung β am meisten gezeichnet. Die Schwingung des Pendels ist auch hier als durchgezogene Linie eingezeichnet. Der Verlauf von β ähnelt der Ausgleichsbewegung aus dem oben beschriebenen Experiment. α zeigt dagegen eine Auslenkung aus der Ruhelage durch den Transport in y -Richtung, die durch eine Ausgleichsbewegung unterdrückt wird. Im unteren Teil der Darstellung sind die entsprechenden Beschleunigungen in farblicher Übereinstimmung gestrichelt gezeigt. $u_x = \ddot{x}$ (blau) wird am Anfang der Bewegung durch den Schwellwert $a_{max} = 10\text{ m/s}^2$ beschränkt. Die anderen beiden Beschleunigungen $u_y = \ddot{y}$ (rot) und $u_z = \ddot{z}$ (grün) liegen am Startpunkt ebenfalls nur knapp darunter. Die Überlagerung der Ausgleichsbewegung mit dem Transport dauert hier nicht länger als die Ausgleichsbewegung alleine.

4.5.2. Physikalische Nachbildung und Simulation des Transports einer hängenden Last in Bullet

In diesem Abschnitt wird der zweite Schritt der Simulation präsentiert: eine physikalische Nachbildung des Pendels mit Hilfe der Physik-Engine Bullet. Die Simulation dient dazu die Dynamik des Modells aus Abbildung 4.1 physikalisch richtig darzustellen. Ziel ist es, die im folgenden Abschnitt präsentierten Experimente möglichst wahrheitsgetreu zu simulieren, um das Verhalten des realen Systems vorhersagen zu können. Für bestimmte Anwendungen soll das Experiment durch die Simulation in Bullet ganz ersetzt werden. Die Anpassung der Reglerparameter (\mathbf{Q} , \mathbf{R}) erfolgt in der Praxis komplett in der Bullet-Simulation. Der optimierte Regler kann anschließend ohne Änderungen für das Experiment übernommen werden.

Des Weiteren können in der Physik-Simulation sehr leicht physikalisch relevante Parameter (hier nur die Länge des Pendels) durch Variation ausprobiert werden. Andere physikalische Größen wie die Erdbeschleunigung g werden dem Experiment sehr genau angepasst. Ein weiteres charakteristisches Merkmal des Experiments sind Verzögerungen in der Übertragung der Werte zwischen dem Regler und System, sogenannte Delays. Diese entstehen einerseits durch die aufwändige Bildbearbeitung zur Bestimmung der Pendelposition und andererseits durch die Robotersteuerung, die über ein Netzwerk mit dem Regler kommuniziert (vgl. vorhergehender Abschnitt). Die Delays haben einen sehr großen Einfluss auf die Güte der Funktionsweise des Reglers. Diese

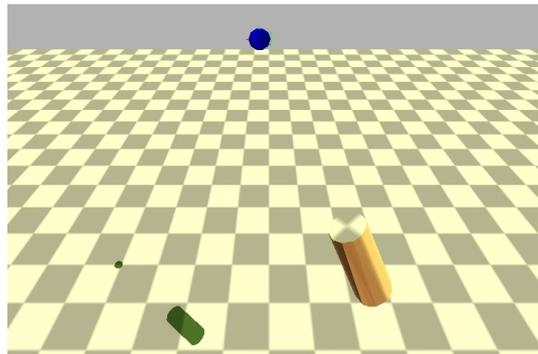
können in die Simulation mit einer beliebigen Länge leicht eingebaut und der Regler unter Berücksichtigung dieser Störfaktoren optimiert werden.

Abbildung 4.11 (a) zeigt einen Ausschnitt aus der graphischen Darstellung der Physik-Simulation. Über einem im Raum platzierten schachbrettmusterten Boden schwebt der Pendelkörper, der durch eine unsichtbare masselose Stange mit Hilfe eines Kugelgelenks mit dem Aufhängepunkt (blauer Punkt) verbunden ist. Das Pendel ist also als Stangen-Pendel simuliert. Solange die Stange 'auf Zug' belastet wird, wie z. B. bei freien Schwingungen, gibt es keine physikalischen Unterschiede zu einem Fadenpendel. Sobald aber der Aufhängepunkt auf den Pendelkörper über die Verbindungsstange drückt, ergeben sich kleine Unterschiede, die zu einem späteren Zeitpunkt diskutiert werden.

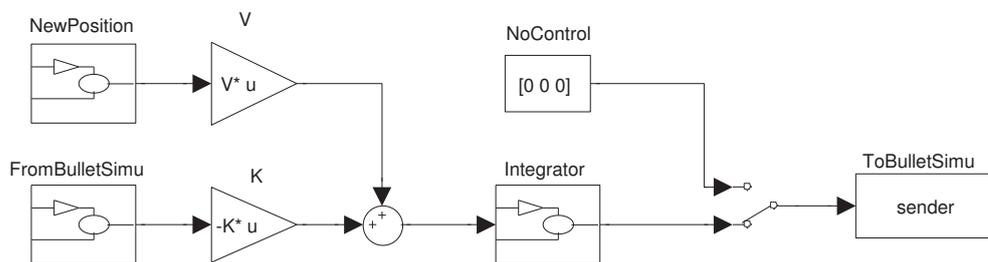
Die Bewegung des Aufhängepunkts wird von einem Riccati-Regler als Simulink-Modell geregelt (vgl. Abbildung 4.11 (b)). Dieser entspricht dem in Abbildung 4.8 (a) gezeigten. Der Block 'Physikalisches Modell' fehlt hier und ist durch zwei Kommunikationsblöcke 'FromBulletSimu' und 'ToBulletSimu' ersetzt. Diese erlauben einen Austausch der für den Regler benötigten Daten mit der Physik-Simulation. Der Datenaustausch der beiden Prozesse läuft, wie in Teilabbildung 4.11 schematisch gezeigt ist, über einen gemeinsamen Speicherbereich [58]. Die Reihenfolge der Abläufe wird mit Hilfe von zwei Semaphoren [23] geregelt, die nach jedem Schreibvorgang freigegeben und nach jedem Lesevorgang gesperrt werden. Das heißt, dass beide Prozesse das Beschreiben des gemeinsamen Speicherbereichs durch den anderen Prozess abwarten und damit die richtige Ablaufreihenfolge gewährleistet wird. Ein Berechnungsschritt für beide Prozesse ist wie auch im Experiment auf 12 ms gesetzt. Das gegenseitige Warten hat keine negativen Auswirkungen auf die Performance.

Abbildung 4.12 präsentiert die Ergebnisse zweier Simulationsexperimente. (a) zeigt eine freie Schwingung eines 0.6 m langen Pendels nach einer Anregung in Richtung β . Die Physik-Simulation ist bei diesem Versuch vom Regler entkoppelt. Der Schalter in Abbildung 4.11 (b) ist im oberen Zustand. Bei genauer Betrachtung der aufgezeichneten Ergebnisse fällt auf, dass der Verlauf von β kleine Stufen aufweist, die länger sind als der Berechnungsschritt von 12 ms. Dies hängt damit zusammen, dass die Bildbearbeitung in dieser Auflösung nur 30 Bilder pro Sekunde auswerten kann und der Regler drei aufeinanderfolgende Berechnungsschritte mit dem gleichen Positionswert des Pendels rechnet. Diese Eigenschaft, die im folgenden Abschnitt genauer beschrieben wird, wurde hier in der Physik-Simulation dem realen Experiment bereits angepasst.

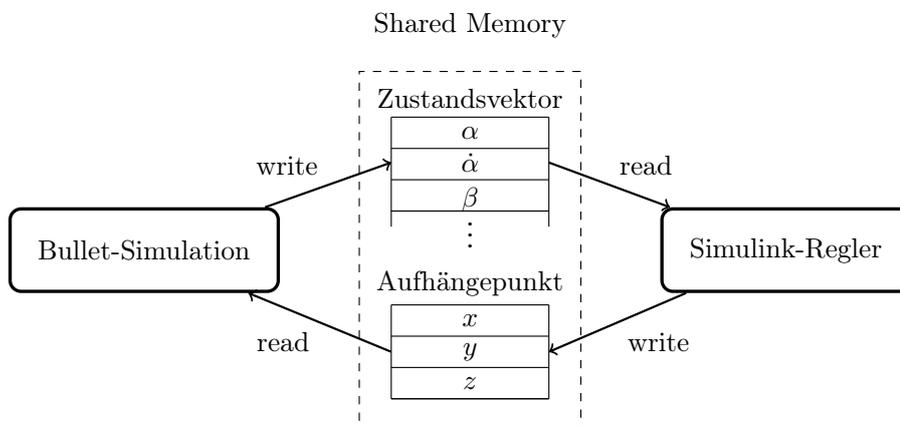
Teilabbildung 4.12 (b) zeigt ein Simulationsexperiment, bei dem das Pendel, wie schon in (a), durch einen Eingriff von außen plötzlich ausgelenkt wird. Nur in diesem Fall ist der Schalter in Abbildung 4.11 (b) im unteren Zustand und der Regler aktiv. Durch den Vergleich der Ergebnisse mit den in Abbildung 4.9 (b) (oberes Diagramm) wird deutlich, dass die Schwingungsunterdrückung sehr ähnlich verläuft. Die Ergebnisse können hier nicht direkt verglichen werden, weil es sich um Pendel unterschiedlicher Längen handelt. Wichtiger ist der Vergleich mit den im Experiment aufgezeichneten Ergebnissen, der im folgenden Kapitel präsentiert wird.



(a) Bullet-Simulation: graphische Darstellung



(b) Riccati-Regler als Simulink-Modell



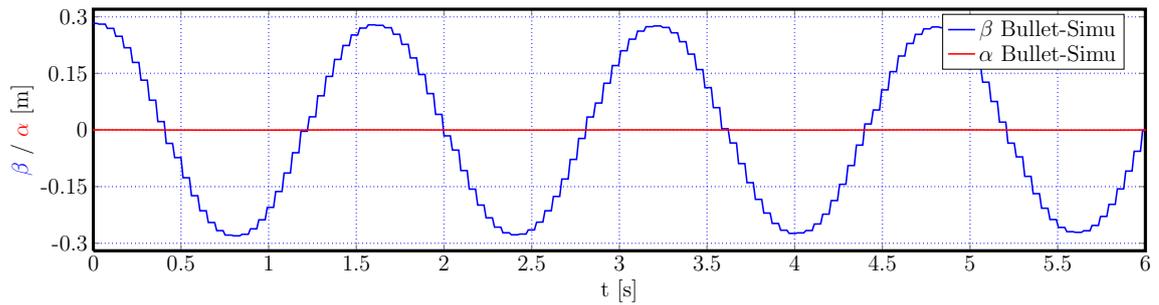
(c) Kommunikation von Simulation und Regler über gem. Speicherbereich

Abbildung 4.11.: (a) Ausschnitt aus der graphischen Darstellung einer Pendelsimulation in Bullet. Blau ist der Aufhängepunkt, gelb der Pendelkörper.

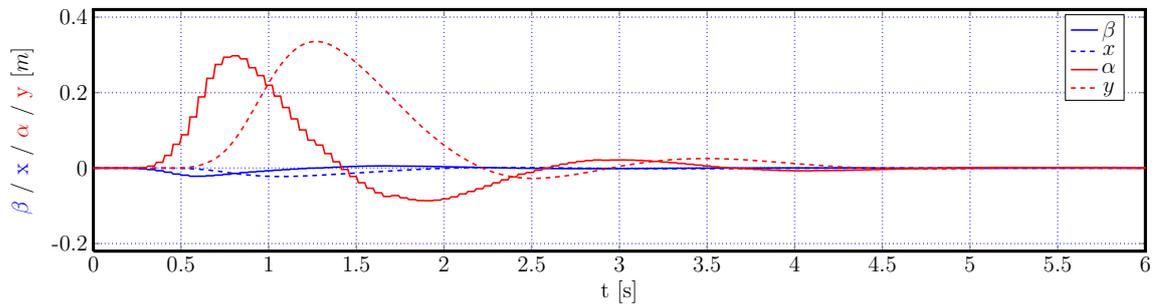
(b) Zustandsregler zur Regelung der Bullet-Simulation. Blöcke 'FromBulletSimu' und 'ToBulletSimu' ersetzen den Block 'Physikalisches System' aus Abbildung 4.8 (a) und tauschen über einen gemeinsamen Speicherbereich 'Shared Memory' Daten mit der Simulation aus.

(c) Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen der Bullet-Simulation und dem Zustandsregler. Die Kommunikation erfolgt mit einer Periode von 12 ms.

4. Pendel - eine hängende Last



(a)



(b)

Abbildung 4.12.: Ergebnisse einer Bullet-Simulation:

(a) zeigt eine freie Schwingung in Richtung β . Der Regler 4.11 (b) ist von der physikalischen Simulation abgekoppelt.

(b) zeigt wie eine plötzlich auftretende Seitenauslenkung unterdrückt wird. Mit α und β ist die Bewegung des Pendels mit x und y die Verschiebung des Aufhängepunkts gezeigt.

Weitere Transportexperimente als Bullet-Simulation werden im direkten Vergleich mit den realen Experimenten im folgenden Kapitel vorgestellt.

4.6. Experimentelle Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden experimentelle Ergebnisse präsentiert und mit Ergebnissen aus der Bullet-Simulation verglichen. Abbildung 4.13 (a) zeigt den ersten Vergleich. Die freie Schwingung aus der Physik-Simulation wird mit der realen Schwingung eines 0.6 m langen und ca. 0.2 kg schweren Pendels verglichen. Die Schwingungen zeigen bei gleicher Anfangsamplitude die gleiche Schwingungsdauer von ca. 1.6 s. Die freie Schwingung ist damit sehr gut wiedergegeben. Da die Anregung einer sauberen Schwingung in eine fest vorgegebene Richtung im Experiment schwierig ist, wurde wie man in der oberen Teilabbildung sieht auch eine Schwingung in Richtung α angeregt.

Teilabbildung 4.13 (b) zeigt analog zu dem in Abbildung 4.12 (b) gezeigten Ex-

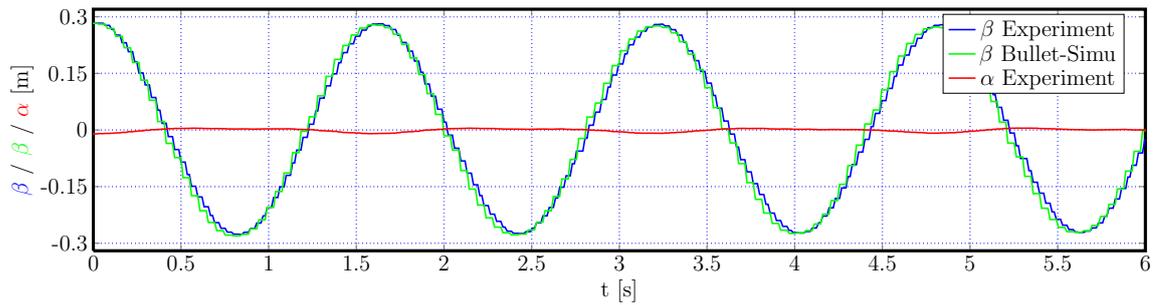
periment die Reaktion des Roboters auf eine plötzliche Auslenkung des Pendels. Die Reaktion der Regelsysteme ist in beiden Fällen sehr ähnlich. Der Vergleich beider Experimente ist deshalb schwierig, weil die plötzliche Auslenkung, welche die Reaktion auslöst, in Experimenten nie exakt gleich gestaltet werden kann. Die Auslenkung in der Simulation und im Experiment erfolgt per Hand.

Neben der Bewegung des Aufhängepunkts des Pendels x und y sind die vom Regler vorgegebenen Sollpositionen ins gleiche Diagramm gepunktet eingezeichnet. Die tatsächliche Position des Roboters ist mit x_{Ist}/y_{Ist} , die vorgegebene Sollposition entsprechend mit x_{Soll}/y_{Soll} bezeichnet. Hier wird eine Datenübermittlungsverzögerung von ca. vier Berechnungsschritten deutlich. Damit ergibt sich ein Delay von 0.048 ms, das in der Simulation bereits eingearbeitet wurde.

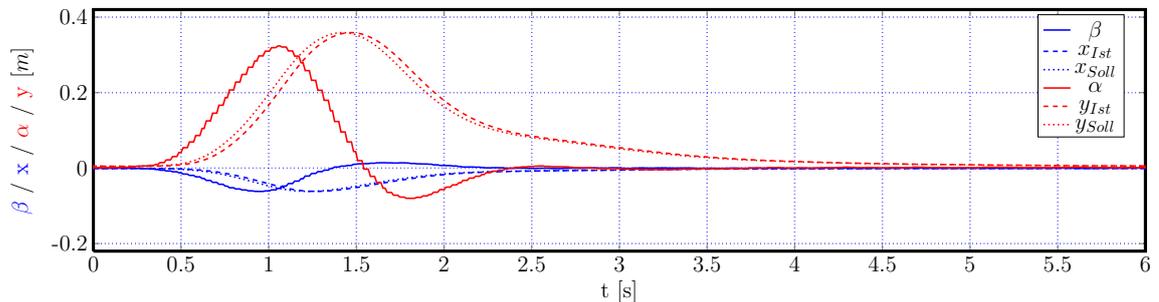
Abbildung 4.14 zeigt die Ergebnisse eines realen Experiments und einer Physik-Simulation in Bullet im Vergleich. Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, sind die entsprechenden Werte immer in einem Diagramm übereinander gezeichnet. Im oberen Teildiagramm ist mit α und β die Bewegung des Pendelkörpers, im unteren mit x , y und z die Bewegung des Aufhängepunkts dargestellt. Daten aus dem Experiment sind als durchgezogene Linie eingezeichnet, Daten aus der Simulation gestrichelt. Das Pendel wird aus einem Anfangszustand, in dem das Pendel ruht erst zu einem Raumpunkt $(x = -0.236, y = -0.353, z = -0.158)^T$ m und nachdem der Stillstand erreicht ist zu einem weiteren Raumpunkt $(x = 0.235, y = 0.347, z = 0.056)^T$ m gefahren. Am Ende wird der Ausgangszustand erreicht. Die maximale Auslenkung des Pendels liegt bei diesem Versuch bei unter 8 cm. An dieser Stelle werden folgende Punkte festgehalten:

- Die Auslenkung des Pendels ist im Vergleich zur zurückgelegten Strecke sehr klein. Angesichts dieser Ergebnisse kann man von einem sehr gut kontrollierbaren Transport sprechen. Der maximale Ausschlag wird immer direkt am Anfang der Bewegung erreicht und wird in kürzester Zeit noch während des Transports unterdrückt.
- Der Aufhängepunkt erreicht seine Position sehr direkt. Diese Tatsache spricht einerseits für ein gutes physikalisches Modell und andererseits für einen sehr guten Regler, dessen Parameter bereits in der Simulation sehr gut optimiert wurden.
- Die Simulation und das Experiment stimmen sehr gut überein. Die Ergebnisse zeigen aus folgenden Gründen diese erstaunliche Übereinstimmung:
 - Der erste Grund für eine derartig gute Übereinstimmung ist, dass der Anfangszustand (ruhend Pendel) wie im Experiment so auch in der Simulation (im Gegensatz zur undefinierbaren plötzlichen Auslenkung) sehr leicht eingehalten werden kann.

4. Pendel - eine hängende Last



(a) Vergleich: freie Schwingung in Richtung β in Simulation und Experiment



(b) Unterdrückung einer plötzlich auftretenden Seitenauslenkung

Abbildung 4.13.: Ergebnisse eines Pendelexperimentes:

(a) zeigt eine freie Schwingung in Richtung β . Da eine Anregung in nur eine Richtung im Experiment schwierig ist, wurde hier auch eine Schwingung in Richtung α angeregt. Grün sind die Werte für β aus der Bullet-Simulation aus Abbildung 4.12 (a) eingezeichnet. Die Simulation der freien Schwingung erfolgt physikalisch korrekt. Die Werte liegen sehr genau übereinander.

(b) zeigt wie eine plötzlich auftretende Seitenauslenkung unterdrückt wird. Es wird die Bewegung des Pendels mit α und β , die Verschiebung des Aufhängepunkts mit x und y gezeigt. Gepunktet sind die vom Regler vorgegebenen Sollwerte dargestellt. Die zeitliche Verzögerung der Ausführung beträgt hier vier Berechnungsschritte, also ca. $4 \cdot 0.012 \text{ ms} = 0.048 \text{ ms}$.

- Die Physik-Engine Bullet gibt den physikalischen Sachverhalt sehr gut wieder.
- Das dynamische System Pendel ist mehr als ausreichend gut durch das präsentierte physikalische Modell beschrieben und der gezeigte Regler ist auf das System bestens abgestimmt.

An dieser Stelle stellt sich aber auch die Frage, woher die kleinen Abweichungen kommen, die man bei sehr genauem Hinschauen vor allem im Verlauf von α und β erkennt. Hierfür könnten die folgenden Gründe verantwortlich sein.

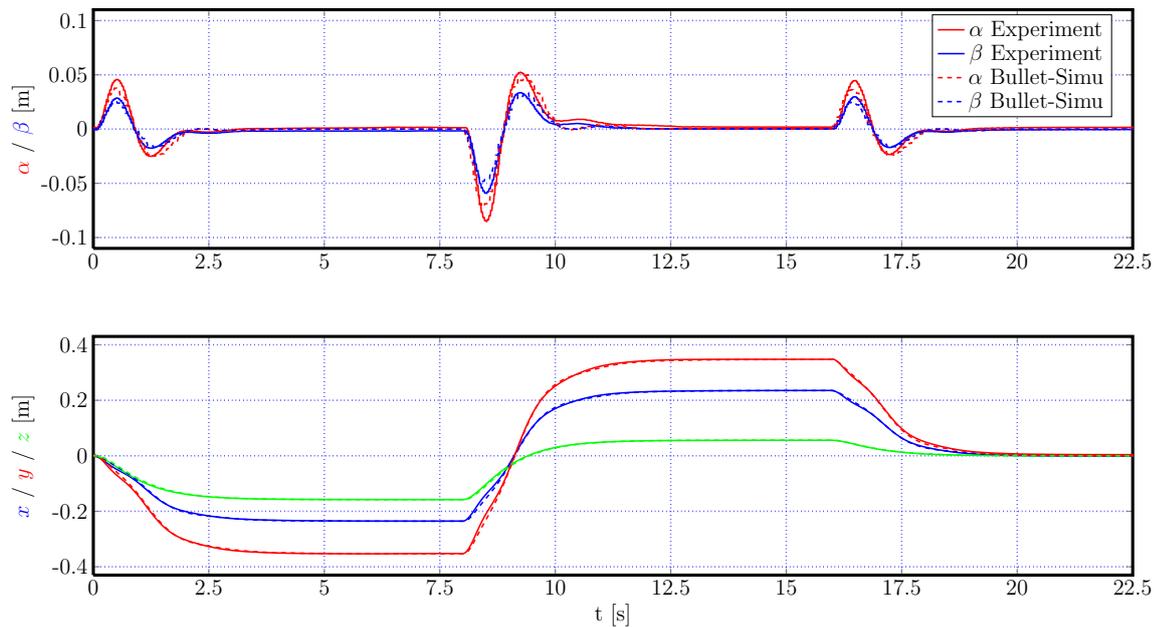


Abbildung 4.14.: Vergleich der Ergebnisse eines Pendeltransports aus einer Bullet-Simulation und einem realen Experiment. Im oberen Teildiagramm ist der Verlauf der Pendelauslenkung im Experiment als durchgezogene und in der Simulation als gestrichelte Linie zu sehen. Im unteren Diagramm ist die Verschiebung des Aufhängepunkts dargestellt. Bei diesem Experiment wird der Aufhängepunkt des Pendels erst in den Raumpunkt $(x = -0.236, y = -0.353, z = -0.158)^T$ m bewegt. Die Spitzenauslenkung bei diesem Vorgang liegt bei unter 5 cm. Anschließend wird der Raumpunkt $(x = 0.235, y = 0.347, z = 0.056)^T$ m angefahren. Hier liegt das Maximum der Auslenkung bei ca. 8 cm. Zum Schluss wird das Pendel in den Anfangszustand zurückgefahren.

- Im realen Versuch handelt es sich um ein Fadenpendel, das aber in der Simulation als Stangenpendel modelliert wurde. Bei aktiven Ausgleichsbewegungen (keine freie Schwingung) führt das durchaus zu leicht unterschiedlichen Reaktionen des Pendels. Eine eventuelle Elastizität des Fadens wird in der Simulation ebenfalls nicht berücksichtigt.
- Abgesehen von den Verzögerungen im Datenaustausch, die in der Simulation sehr einfach simuliert werden können, ist es für die Wirkung des Reglers sehr wichtig, wie die vorgegebenen Punkte für den Aufhängepunkt erreicht werden. In der Simulation wird der Punkt am Anfang des Berechnungsschritts einfach auf einen neuen Wert gesetzt und wirkt über die starre Verbindung auf den Pendelkörper. Im Experiment muss der träge Manipulator in den Punkt bewegt werden, was sich je nach Entfernung in der Fahrzeit niederschlägt.
- Bei einem dynamischen System können nur theoretisch zwei gleiche Zustände

erreicht werden. Da der Regler auf den Zustand des Systems reagiert, hat dies zur Folge, dass der gleiche Regler auf zwei ähnliche aber nicht gleiche Zustände auch nur ähnlich reagiert. Dazu kommen für alle numerischen Berechnungen typische Rundungsfehler hinzu.

- Der Luftwiderstand oder andere Reibungseffekte spielen hier eine untergeordnete Rolle, weil die typischen Regelungszeiten viel kürzer sind als die Zeitintervalle, in denen sich ein reibungsbedingter Abfall der Amplitude beobachten lässt.

Die vollständige Berechnung des hier sowohl in der Bullet-Simulation als auch im Experiment verwendeten Reglers, erfolgt durch das MATLAB-Skript im Anhang A.6.

4.7. Schätzung der Pendellänge

Wie aus der Berechnung des Reglers in den Skripten im Anhang A.1 und A.6 hervorgeht, geht von den physikalischen Parametern nur die Länge des Pendels l (bzw. das Verhältnis g/l) in die Berechnung der Rückführungsmatrix \mathbf{K} ein. Im Gegensatz zur Masse, die bei einem mathematischen Pendel nicht von Bedeutung ist, bestimmt die Länge die Periodendauer der Schwingung. Die Formel

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (4.24)$$

gibt die Periodendauer eines in einer Ebene schwingenden Pendels in erster Näherung an. (4.24) bringt richtig zum Ausdruck, dass ein längeres Pendel langsamer schwingt. Tatsächlich hängt aber die Periodendauer auch noch von der maximalen Auslenkung des Pendels ab. Dies bringt die folgende Formel zum Ausdruck

$$T = 2\pi \left(1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\phi_{max}}{2}\right) + \left(\frac{3}{8}\right)^2 \cdot \sin^4\left(\frac{\phi_{max}}{2}\right) + \dots \right). \quad (4.25)$$

Da ϕ_{max} hier für die maximale Amplitude der Schwingung steht, muss für $\phi_{max} = \arcsin(\alpha_{max}/l)$ eingesetzt werden. Aus der entstandenen Gleichung können im Allgemeinen mehrere Lösungen für l bestimmt werden, die zum Teil auch imaginär sein können. Aufgrund bestimmter Ausschlusskriterien können alle bis auf eine ausgeschlossen werden.

Um die Gleichung (4.25) lösen zu können, müssen für α und T Werte eingesetzt werden, die aus dem Experiment bestimmt werden müssen. Da die Schwingungen in x - und y -Richtung nicht entkoppelt sind (nur bei der Linearisierung der Gleichungen entkoppeln diese), muss bei der Bestimmung möglichst eine Schwingung in einer Ebene angeregt werden. Dazu wird wie folgt vorgegangen: das Pendel wird aus dem Ruhezustand heraus ruckartig ein Stück zur Seite in eine Richtung gefahren. Dadurch wird eine Schwingung angeregt. Die Schwingung wird aufgenommen und mit einer

Sinusfunktion gefittet. Aus der berechneten Sinusfunktion wird die maximale Amplitude α_{max} und die Periodendauer bestimmt und in die Formel (4.25) eingesetzt. Damit kann die Länge eindeutig ermittelt werden.

Zur Evaluation des Verfahrens zur Längenbestimmung wurde eine Fehlerabschätzung gemacht. Die Fehler resultieren aus dem Rauschen der Kamera im Experiment und der Positionsbestimmung in Bullet. Durch das Anpassen der Sinusfunktion, die auch nur in erster Näherung die Schwingung beschreibt, kommt eine weitere Ungenauigkeit hinzu. Bei Pendellängen bis ca. 1.5 m wurde der maximale Fehler auf einen Zentimeter beschränkt.

Dieses Vorgehen wurde zur Berechnung von Reglermatrizen bei Pendeln unbekannter Länge erfolgreich eingesetzt.

5. Inverses Pendel

Das inverse Pendel ist ein Klassiker der Regelungstechnik. Es wurde vielfach in der Literatur behandelt. Die Regelung von ebenen inversen Mehrfachpendeln mit bis zu drei und mehr passiven Gelenken stellt aus wissenschaftlicher Sicht keine Herausforderung mehr dar. Der Schwerpunkt der aktuellen Publikationen liegt auf Auschwingvorgängen. Diese Arbeit behandelt keine Aufschwingvorgänge, weil der hier präsentierte Regler in seiner Reinform dazu nicht geeignet ist. In Kombination mit einem Feedforward-Controller wurde er aber für Aufschwingvorgänge eingesetzt (vgl. z. B. [35]).

Die Regelung eines inversen Pendels stellt hohe Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit des Reglers und erfordert im Vergleich zu stabilen Systemen schnelle und genaue Winkel- oder Positionssensoren. Deshalb wird das inverse Pendel hier zum Test der Echtzeitfähigkeit des präsentierten Reglersystems. Das physikalische Modell und die Bewegungsgleichungen des inversen Pendels werden hier mit nur einer kleinen Vorzeichenänderung aus dem Modell des einfachen Pendels abgeleitet. Anschließend werden Simulationen als Simulink- und Bullet-Modell präsentiert und Simulationsergebnisse diskutiert.

5.1. Aufbau des physikalischen Modells

Als physikalisches Modell eines inversen Pendels kann das in Abbildung 4.1 vorgestellte Modell ohne Änderungen übernommen werden.

5.2. Ableitung der Bewegungsgleichungen

Für die Bewegungsgleichungen (4.6) und (4.7) eines inversen Pendels auf der Basis des präsentierten physikalischen Modells ergibt sich im Vergleich zum einfachen Pendel nur eine kleine Änderung. In diesem Fall müssen γ und $\dot{\gamma}$ in (4.3) und (4.4) mit dem unteren Vorzeichen gewählt werden, da sich die Ruhelage des inversen Pendels oberhalb der α/β -Ebene befindet.

Damit lässt sich für das inverse Pendel ein Riccati-Regler ableiten.

5.3. Mathematische Ableitung eines Riccati-Reglers

Da es sich hier um das gleiche physikalische Modell wie beim einfachen Pendel handelt, wird auch zur Beschreibung des inversen Pendels der Zustandsvektor aus (4.8) verwendet. Obwohl der Arbeitspunkt des inversen Pendels die labile Ruhelage in Richtung der negativen γ -Achse ist, also anders als beim einfachen Pendel, ist die Darstellung des Zustandsvektors im Arbeitspunkt die gleiche wie in (4.12). Dies hängt damit zusammen, dass in den beiden Fällen unterschiedliche Halbräume betrachtet werden (vgl. Vorzeichen von γ).

Für die linearisierte Systemmatrix \mathbf{A}_0 (4.13) ergibt sich aus vorausgegangenen Überlegungen

$$\mathbf{A}_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g/l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g/l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5.1)$$

\mathbf{B}_0 und \mathbf{C} bleiben wie in (4.16) und (4.17). Das Steuerbarkeitskriterium (4.21) ist auch für dieses Matrixsystem erfüllt.

Wie in Abbildung 5.1(a) gezeigt, ändert sich die EWK im Vergleich zu der des normalen Pendels (vgl. 4.2 (a)) entscheidend: alle Eigenwerte sind reell und liegen symmetrisch um die imaginäre Achse. Diese EWK ist charakteristisch für ein monoton instabiles System. Eine kleine Auslenkung des Systems führt dazu, dass der Zustandsvektor \mathbf{x} ins Unendliche abwandert. Eine daraus tatsächlich resultierende ungedämpfte Schwingung taucht in der EWK nicht auf, da bei der Aufstellung der Bewegungsgleichungen des inversen Pendels auf eine Fallunterscheidung verzichtet wurde. Es liegt hier ein höchst instabiles System vor.

Der rechte Teil der Abbildung 5.1 zeigt die EWK der Zustandsregelung $\mathbf{A}_0 - \mathbf{B}_0\mathbf{K}$ mit den Gewichtungsmatrizen $\mathbf{Q} = \text{diag}(100, 10, 100, 10, 100, 10, 100, 10, 100, 10)$, $\mathbf{R} = \text{diag}(10, 10, 10)$ und den Konstanten, wie auch beim normalen Pendel, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ und $l = 1 \text{ m}$. Alle Eigenwerte liegen links der imaginären Achse und der Regler ist somit stabil.

Im Anhang A.2 befindet sich das komplette MATLAB-Skript für die Berechnung des hier vorgestellten Riccati-Reglers.

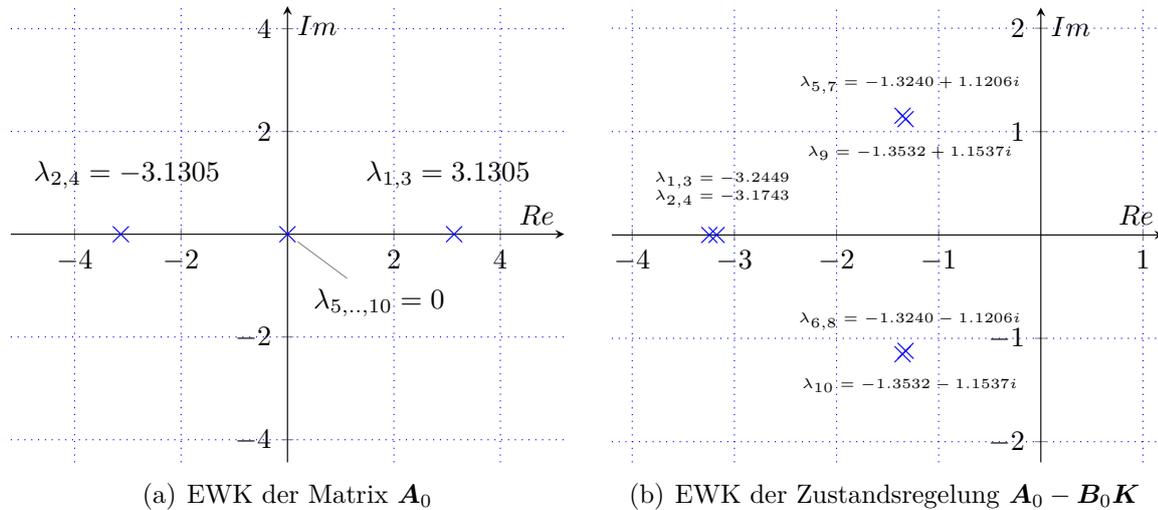


Abbildung 5.1.: EWK des Systems inverses Pendel:

(a) EWK der Matrix A_0 des Systems inverses Pendel mit frei beweglichem Gelenkpunkt ($l = 1$ m und $g = 9.8$ m/s²). Die Eigenwerte $\lambda_{1,3}$ und $\lambda_{2,4}$ sind reell und liegen symmetrisch um die imaginäre Achse. Diese EWK charakterisiert ein monoton instabiles System. Der sechsfache Eigenwert $\lambda_{5,\dots,10}$ entspricht der Bewegung des Gelenkpunkts in drei Raumrichtungen.

(b) EWK der Zustandsregelung $A_0 - B_0K$ mit den Gewichtungsmatrizen $Q = \text{diag}(100, 10, 100, 10, 100, 10, 100, 10, 100, 10)$ und $R = \text{diag}(10, 10, 10)$, $g = 9.8$ m/s² und $l = 1$ m. Sämtliche Eigenwerte $\lambda_{1,\dots,10}$ liegen links der imaginären Achse somit ist der berechnete Regler stabil.

5.4. Simulationen und Simulationsergebnisse

5.4.1. Modellsimulation in Simulink

Abbildung 4.8 stellt auch das Simulationsmodell für das physikalische System des inversen Pendels in Simulink dar. Wie bereits in Abschnitt 5.2 diskutiert wurde, muss in den Bewegungsgleichungen (4.6) und (4.7) lediglich das Vorzeichen für γ und $\dot{\gamma}$ in (4.3) und (4.4) richtig gewählt werden. Die Berechnung der Reglermatrizen erfolgt mit dem MATLAB-Skript im Anhang A.2.

Im Folgenden sollen die in Abbildung 5.2 präsentierten Simulationsergebnisse diskutiert werden. Auch hier sind Startbedingungen für alle Experimente gleich: $\beta_0 = 0.3$ m und alle anderen Elemente des Zustandsvektors gleich Null. Auf eine Darstellung eines Experiments ohne Regelung wird hier verzichtet, weil Simulink die Berechnung abbricht, sobald das Pendel beim Umfallen die α/β -Ebene erreicht. Die Berechnung scheitert deshalb, weil γ aus (4.3) in diesem Fall zu Null wird und man in (4.6) und (4.7) einen endlichen Wert durch Null teilt.

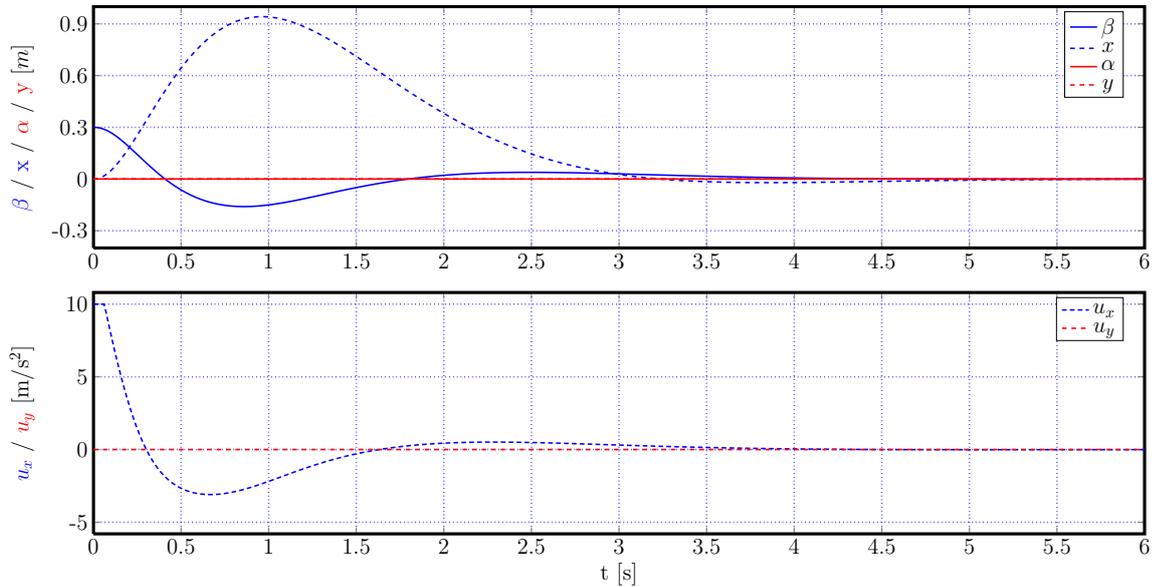
Im Teil (a) der Abbildung 5.2 ist ein Stabilisierungsvorgang um den Ursprung des

Welt-KS nach einer Anfangsauslenkung dargestellt. Im oberen Diagramm sind die Auslenkungen β bzw. α (blau bzw. rot durchgezogen) zu sehen, wobei α für die ganze Dauer des Versuchs Null bleibt. Des Weiteren ist die Ausgleichsbewegung des Gelenkpunkts gestrichelt eingezeichnet. Auch hier ist nur die Bewegung in x -Richtung (blau) interessant, weil y (rot) aufgrund der fehlenden Auslenkung in Richtung α ebenfalls Null bleibt. Auffällig ist hier, dass im Vergleich zum einfachen Pendel (vgl. Abbildung 4.9) der Weg x , der zum Abfangen der gleichen Anfangsauslenkung notwendig ist, deutlich länger ist. Im unteren Teil des Diagramms ist die Beschleunigung des Gelenkpunkts eingezeichnet. Diese ist am Anfang der Ausgleichsbewegung durch $a_{max} = 10 \text{ m/s}^2$ beschränkt und muss später für den verwendeten Manipulator angepasst werden. Wenn die Anfangsauslenkung zu groß gewählt wird, kann es passieren, dass die maximale Beschleunigung des Gelenkpunkts nicht ausreicht, um das fallende Pendel aufzufangen. Auch der Transport des Pendels auf größere Entfernungen kann problematisch werden. Hier muss das Eingangsteilsignal der Vorfiltermatrix durch eine zusätzliche Vorrichtung abhängig von der Entfernung zum Zielpunkt beschränkt werden. Diese Erweiterung des Reglers wird im Zusammenhang mit dem Transport einer Kugel auf einem Tablett in Abschnitt 7.5.1 behandelt. Dort besteht die Gefahr, dass bei einer zu starken Beschleunigung des Tablett die Kugel über den Rand des Tablett hinaus rollt. Der Stabilisierungsvorgang dauert hier, wie auch schon beim einfachen Pendel, ca. 3 s.

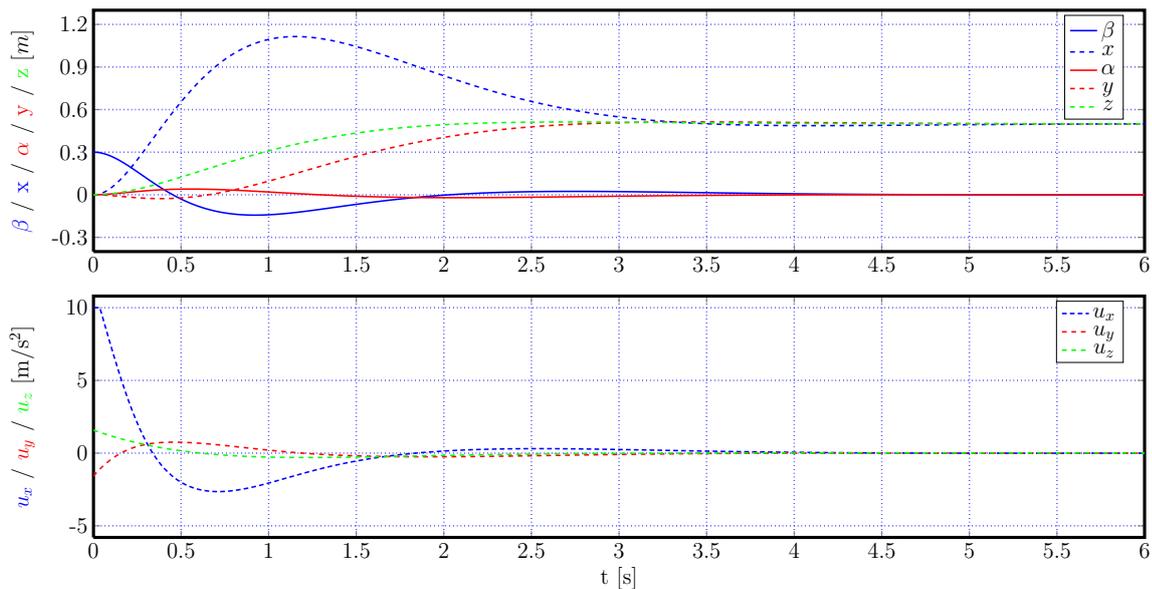
Teil (b) der Abbildung 5.2 zeigt einen Transportvorgang, der von einer Ausgleichsbewegung überlagert ist. Der Transport erfolgt wie schon beim einfachen Pendel aus dem Ursprung des Welt-KS in den Raumpunkt $(x = 0.5, y = 0.5, z = 0.5)^T \text{ m}$. Der Ausgangszustand ist wie in (a). Der Wegverlauf des Gelenkpunkts ist gestrichelt eingezeichnet, die Auslenkungen des Pendels als durchgezogene Linie. Die Verschiebung des Gelenkpunkts in z -Richtung (grün) wird sehr direkt ausgeführt, weil diese Bewegung die Auslenkung des Pendels nur indirekt beeinflusst. Die y -Verschiebung (rot) zeigt in ihrem Verlauf eine leichte Ausgleichsbewegung, weil hier die Verbindung zur Auslenkung in α -Richtung sehr direkt ist. Den größten Ausschlag zeigt x (blau). Dies liegt an der Anfangsauslenkung in Richtung β . Der Transportvorgang dauert ca. 3 s und damit nicht länger als der Stabilisierungsvorgang um den Ursprung des Welt-KS. Dies liegt daran, dass der Transport durch die Anfangsbedingungen begünstigt wird (vgl. Abbildung 4.1).

5.4.2. Physikalische Nachbildung und Simulation des inversen Pendels in Bullet

In diesem Abschnitt wird die physikalische Nachbildung des inversen Pendels mit Hilfe der Physik-Engine Bullet präsentiert. Da sich der präsentierte Regler nur in Kombination mit anderen Reglern für Aufschwingvorgänge eignet, lohnen sich reale, im Aufbau aufwendige Versuche nicht, um die Performance des Reglers vorzuführen.



(a) Stabilisierung eines inversen Pendels mit Anfangsauslenkung $\beta_0 = 0.3 \text{ m}$.



(b) Transport und Stabilisierung eines inversen Pendels mit Anfangsauslenkung $\beta_0 = 0.3 \text{ m}$.

Abbildung 5.2.: Simulationsergebnisse inverses Pendel in Simulink:

(a) zeigt den Vorgang der Stabilisierung eines inversen Pendels mit Anfangswerten $\beta_0 = 0.3 \text{ m}$ und alle anderen Zustände gleich Null im Ursprung des Welt-KS.

(b) zeigt eine Überlagerung aus einem Transport- und einem Stabilisierungsvorgang mit Anfangswerten wie in (a). Der Transport erfolgt aus dem Ursprung des Welt-KS in den Raumpunkt $(x = 0.5, y = 0.5, z = 0.5)^T \text{ m}$.

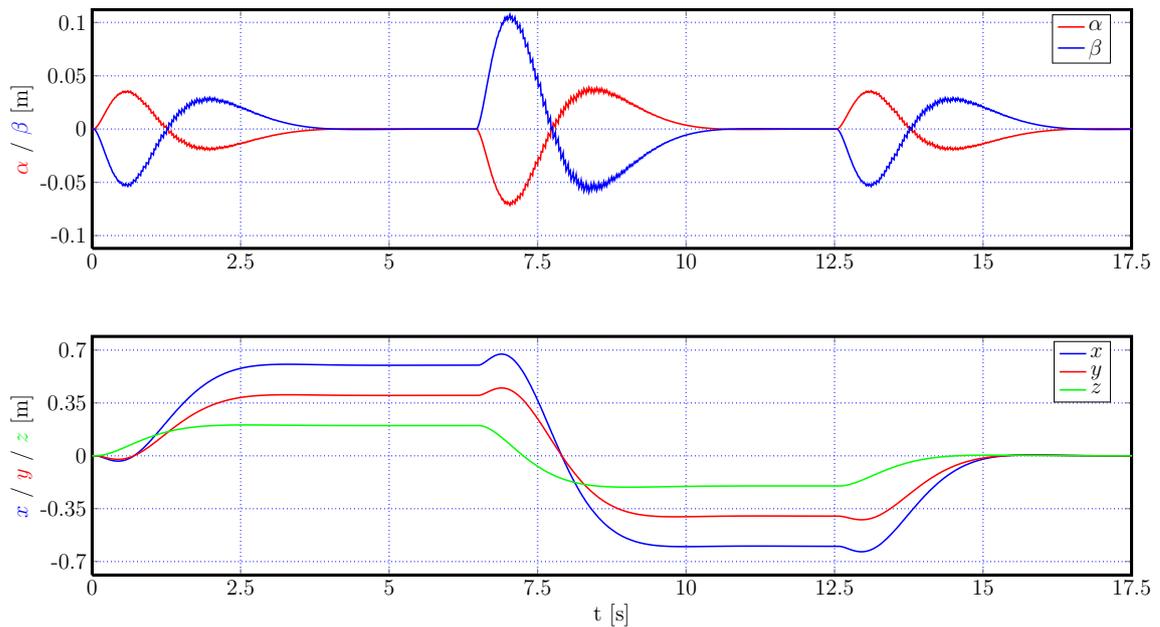


Abbildung 5.3.: Ein Transportexperiment mit einem 1 m langen inversen Pendel. Das obere Teildiagramm zeigt die Bewegung der Pendelspitze, das untere die Bewegung des Gelenkpunkts. Der Gelenkpunkt wird aus dem Ursprung erst in den Raumpunkt $p = (x = 0.6, y = 0.4, z = 0.2)^T$ m dann in den Punkt $-p$ und schließlich wieder in den Ursprung transportiert.

Wie bereits erwähnt, lassen sich physikalische Simulationen mit Hilfe von Bullet im Gegensatz zu realen Experimenten sehr einfach gestalten. Ausgiebige Untersuchungen des einfachen Pendels in der physikalischen Simulation und im Experiment zeigten eine sehr gute Übereinstimmung. Deshalb wird im Folgenden ein Simulationsversuch gezeigt und diskutiert.

Der Datenaustausch zwischen dem physikalischen Modell in Bullet und dem Regler in Simulink erfolgt über einen gemeinsamen Speicherbereich, der streng abwechselnd beschrieben und ausgelesen wird (s. Abbildung 4.11 (c)). Der Regler aus Abbildung 4.11 (b) kann nach Anpassung der Reglermatrizen \mathbf{K} und \mathbf{V} ohne sonstige Änderungen übernommen werden. Auch das physikalische Modell in Bullet kann wieder benutzt werden (vgl. Abbildung 4.11 (a)).

Abbildung 5.3 zeigt ein Transportexperiment mit einem inversen Pendel der Länge 1 m. Bei diesem Versuch wird der Gelenkpunkt über zwei Zwischenpunkte $p = (x = 0.6, y = 0.4, z = 0.2)^T$ m und $-p$ wieder in den Ursprung transportiert. Die größte Auslenkung der Pendelspitze aus der labilen Ruheposition beträgt ca. 10 cm. Das Experiment zeigt eine sehr gute Funktionsweise des Reglers.

Eine wichtige Erkenntnis aus diesem Versuch ist die folgende. Die Werte von α und β im oberen Teildiagramm weisen keine Stufenstruktur auf. Die Stufenform wurde

hier nicht simuliert, weil es bei diesem Versuch nicht gelungen ist, den präsentierten Riccati-Regler mit dem simulierten Stufenverhalten von 30 fps (Frames per Second) stabil zu gestalten. Für das Experiment heißt es, dass für die Verwendung dieses Reglers eine schnellere Bildbearbeitung erforderlich ist oder die fehlenden Daten mit Hilfe des Modells geschätzt werden müssen. Die Simulation der Verzögerung im Datenaustausch wurde aus dem Versuch mit dem einfachen Pendel übernommen und hat erstaunlicherweise keinen großen Einfluss auf die Stabilität des Reglers.

Hier zeigt sich ein Vorteil des in dieser Arbeit präsentierten Konzepts: Schwächen des Systems werden bereits in der Simulation erkannt.

6. Transport von zwei Pendeln

Um die Universalität des präsentierten Konzepts zu zeigen, wird in diesem Kapitel ein sehr komplexes dynamisches System behandelt. Es besteht aus zwei Pendeln an den Enden eines Stabes. Der Greifpunkt einer Transportkinematik ist einer der Aufhängepunkte. Dadurch, dass die Stablänge fest ist, ist die Regelgröße damit fünfdimensional. Durch die beiden Pendel kommen noch weitere vier Freiheitsgrade hinzu. Das physikalische Modell kann nur teilweise übernommen werden und muss um einen Stab und ein zweites Pendel ergänzt werden. Die Bewegungsgleichungen des ersten Pendels können aufgrund des Greifpunkts der Kinematik ohne Änderung übernommen werden. Die Gleichungen für das zweite Pendel werden aus dem physikalischen Modell abgeleitet. Der weitere Verlauf des Kapitels ist wie gewohnt: auf die Berechnung des Reglers folgen Stabilitätsbetrachtungen und Simulationen. Eine Präsentation und Diskussion der Simulationsergebnisse rundet das Kapitel ab.

6.1. Aufbau des physikalischen Modells

Das physikalische Modell des dynamischen Systems zweier Pendel an den Enden eines Stabes ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Es besteht aus zwei großen Massen M_1 und M_2 , die durch einen Stab der Länge d verbunden sind. Die kleinen Massen m_1 und m_2 sind durch Kugelgelenke mit den entsprechenden großen Massen M_1 und M_2 verbunden. m_1 und m_2 bewegen sich auf gedachten Kugelschalen mit den Radien l_1 und l_2 und bilden damit zwei sphärische Pendel. Die Bewegung der Masse M_1 wird durch den Ortsvektor \mathbf{x} , die der Masse m_1 durch \mathbf{x}' im raumfesten KS (x,y,z) beschrieben. Die Lage der Masse M_2 wird relativ zu M_1 im blau markierten KS (α,β,γ) mit Hilfe der Koordinaten α_d und β_d festgelegt. Im grün markierten KS beschreiben die Koordinaten ϕ , θ und ρ die Bewegung der Masse m_2 relativ zu M_2 . Die Orientierung der Achsen der blau und grün markierten KS ist fest und bleibt parallel zu den Achsen des raumfesten Welt-KS. Die Ursprünge sind unter der Bedingung des festen Abstandes frei verschiebbar. In dieser Darstellung zeigt die Erdbeschleunigung g in die negative z -Richtung des raumfesten KS.

6.2. Ableitung der Bewegungsgleichungen

Auf der Basis des in Abbildung 6.1 dargestellten Modells können nach dem Lagrange'schen Prinzip Bewegungsgleichungen abgeleitet werden. Dazu wird die Lagrange-

funktion aufgestellt, die sich aus der kinetischen Energie T und der negativen potentiellen Energie V als Summe zusammen setzt

$$L = T - V \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2}M_1 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2}m_1 ((\dot{x} + \dot{\beta})^2 + (\dot{y} + \dot{\alpha})^2 + (\dot{z} - \dot{\gamma})^2) \\ &\quad + \frac{1}{2}M_2 ((\dot{x} + \dot{\beta}_d)^2 + (\dot{y} + \dot{\alpha}_d)^2 + (\dot{z} - \dot{\gamma}_d)^2) \\ &\quad + \frac{1}{2}m_2 ((\dot{x} + \dot{\beta}_d + \dot{\theta})^2 + (\dot{y} + \dot{\alpha}_d + \dot{\phi})^2 + (\dot{z} - \dot{\gamma}_d - \dot{\rho})^2) \\ &\quad - \underbrace{M_1gz - m_1g(z - \gamma) - M_2g(z - \gamma_d) - m_2g(z - \gamma_d - \rho)}_{=-V}. \end{aligned} \quad (6.2)$$

Da l_1 , l_2 und d fest sind, können γ , γ_d und ρ mit den Beziehungen

$$\gamma = \pm \sqrt{l^2 - \alpha^2 - \beta^2}, \quad (6.3)$$

$$\gamma_d = \pm \sqrt{l^2 - \alpha_d^2 - \beta_d^2}, \quad (6.4)$$

$$\rho = \pm \sqrt{l^2 - \phi^2 - \theta^2} \quad (6.5)$$

und den daraus folgenden Zeitableitungen (vgl. (4.4)) aus der Lagrangefunktion eliminiert werden. Mit dem gleichen Argument wie beim einfachen Pendel wird hier auf eine Fallunterscheidung verzichtet und für weitere Betrachtungen das obere Vorzeichen gewählt. Nach der Vorschrift (4.5) mit $q_1 = \alpha$, $q_2 = \beta$, $q_3 = \phi$ und $q_4 = \theta$ können anschließend die Bewegungsgleichungen für q_i abgeleitet werden. Die Bewegungsgleichungen für α und β nehmen erwartungsgemäß die Form (4.6) und (4.7) an, wobei l durch l_1 zu ersetzen ist. Für ϕ (bzw. θ) ergibt sich folgende Abhängigkeit:

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} = & \frac{1}{\rho^2 \gamma_d^3 l_2^2} \left(\gamma_d^3 \phi \dot{\phi}^2 l_2^2 - \gamma_d^3 \phi^3 \dot{\theta}^2 + \gamma_d^3 \phi \dot{\theta}^2 l_2^2 + \dot{\alpha}_d^2 \phi \rho^3 d^2 - \alpha_d^2 \dot{\beta}_d^2 \phi \rho^3 \right. \\ & + \dot{\beta}_d^2 \phi \rho^3 d^2 - \dot{\alpha}_d^2 \beta_d^2 \phi \rho^3 + \gamma_d^3 \phi \rho^3 g - \gamma_d^3 \phi \dot{\phi}^2 \theta^2 + 2\alpha_d \dot{\alpha}_d \beta_d \dot{\beta}_d \phi \rho^3 + 2\gamma_d^3 \phi^2 \dot{\phi} \theta \dot{\theta} \\ & + \gamma_d^3 \phi \theta^3 \ddot{x} + \gamma_d^3 \phi^3 \theta \ddot{x} - \gamma_d^3 \phi \theta l_2^2 \ddot{x} + \gamma_d^3 \phi \rho^3 \ddot{z} \\ & + \gamma_d^3 l_2^4 \ddot{y} - 2\gamma_d^3 \phi^2 l_2^2 \ddot{y} + \gamma_d^3 \phi^4 \ddot{y} - \gamma_d^3 \theta^2 l_2^2 \ddot{y} + \gamma_d^3 \phi^2 \theta^2 \ddot{y} \\ & + \alpha_d \phi \rho^3 d^2 \ddot{\alpha}_d - \alpha_d \beta_d^2 \phi \rho^3 \ddot{\alpha}_d + \gamma_d^3 l_2^4 \ddot{\alpha}_d - 2\gamma_d^3 \phi^2 l_2^2 \ddot{\alpha}_d \\ & + \gamma_d^3 \phi^4 \ddot{\alpha}_d - \gamma_d^3 \theta^2 l_2^2 \ddot{\alpha}_d - \alpha_d^3 \phi \rho^3 \ddot{\alpha}_d + \gamma_d^3 \phi^2 \theta^2 \ddot{\alpha}_d \\ & \left. + \gamma_d^3 \phi \theta^3 \ddot{\beta}_d + \gamma_d^3 \phi^3 \theta \ddot{\beta}_d - \beta_d^3 \phi \rho^3 \ddot{\beta}_d + \beta_d \phi \rho^3 d^2 \ddot{\beta}_d - \alpha_d^2 \beta_d \phi \rho^3 \ddot{\beta}_d - \gamma_d^3 \phi \theta l_2^2 \ddot{\beta}_d \right). \end{aligned} \quad (6.6)$$

Auch hier ergibt sich die Gleichung für $\ddot{\theta}$ aus (6.6) durch Vertauschen der Variablen x mit y , α_d mit β_d und ϕ mit θ bzw. die entsprechenden Zeitableitungen, weil das physikalische Modell in diesen Koordinaten völlig symmetrisch ist (vgl. Abbildung 6.1). Für γ , γ_d und ρ sind die Beziehungen (6.3), (6.4) und (6.5) entsprechend einzusetzen.

Damit ist die mathematische Beschreibung vollständig und der Riccati-Regler kann für das vorliegende System abgeleitet werden.

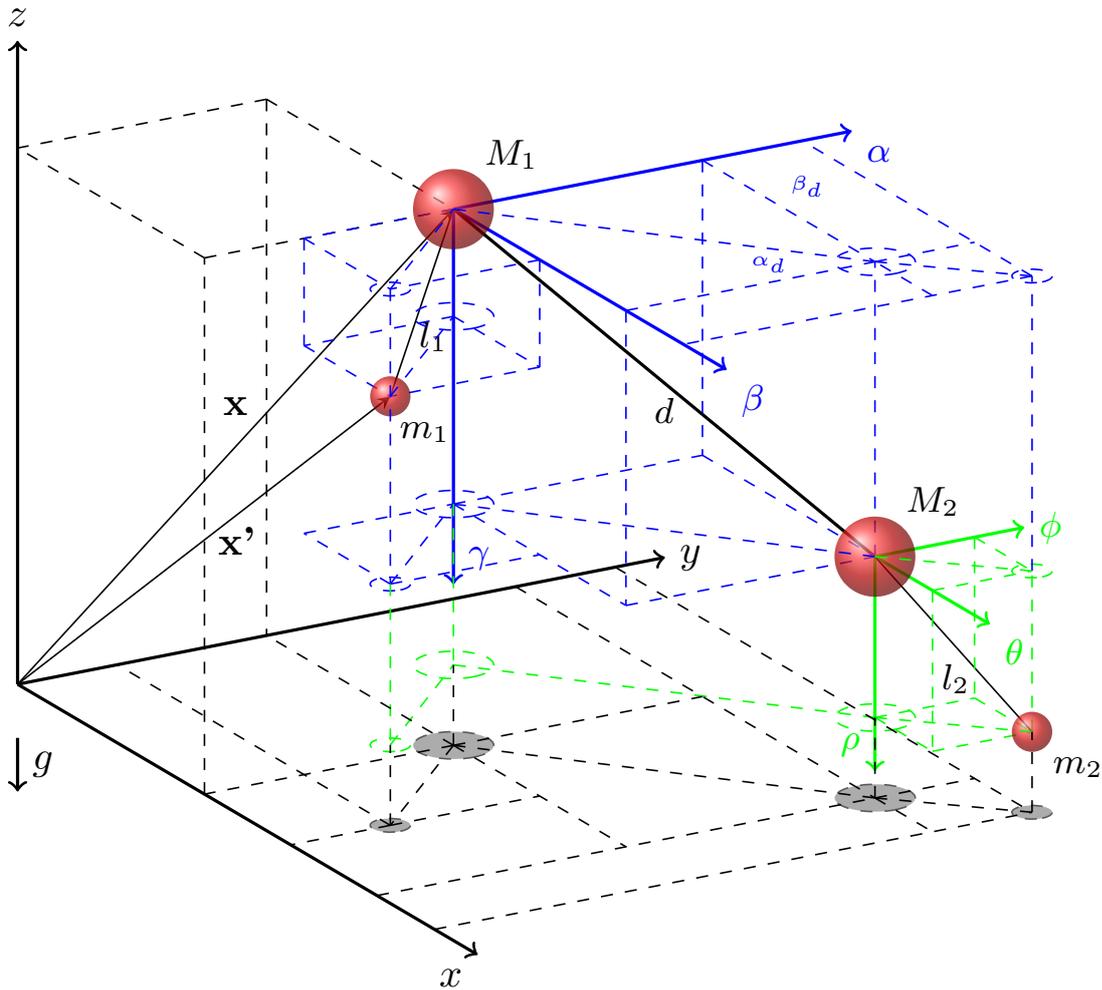


Abbildung 6.1.: Physikalisches Modell zweier hängender Lasten - zwei Pendel an den Enden eines Stabes

6.3. Mathematische Ableitung eines Riccati-Reglers

Zur eindeutigen Beschreibung des Systemzustands wird ein Zustandsvektor mit 18 Dimensionen eingeführt

$$\mathbf{x} = (\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}, \alpha_d, \dot{\alpha}_d, \beta_d, \dot{\beta}_d)^T, \quad (6.7)$$

der Steuervektor der Regelung ist

$$\mathbf{u} = (\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \ddot{\alpha}_d, \ddot{\beta}_d)^T. \quad (6.8)$$

Alle Bezeichnungen beziehen sich auf die Abbildung 6.1. Die ersten acht Zustände in (6.7) beschreiben die Bewegung der beiden Pendel und die letzten zehn die Position

und Orientierung des verbindenden Stabes. In (6.8) bezeichnen die ersten drei Komponenten des Steuervektors die Beschleunigung des ersten Aufhängepunkts, die letzten zwei die Beschleunigung der Masse M_2 am anderen Ende des Stabes.

Die Linearisierung der Matrizen erfolgt nach den Vorschriften (4.13) und (4.14) um die Ruhelage des Systems $\mathbf{x}_0 = \mathbf{0}$. Die Ruhelage des Stabes wird wie folgt gewählt: nach unten gerichtet und in Ruhe ($\alpha_d = 0$, $\dot{\alpha}_d = 0$, $\beta_d = 0$, $\dot{\beta}_d = 0$). Ausgehend von diesem Zustand ist beim ruhenden oberen Pendel die größtmögliche Kontrolle über das untere Pendel möglich und die beiden Pendel können fast unabhängig voneinander geregelt werden. Der Grad der Unabhängigkeit nimmt ab, je weiter der Stab aus seiner Ruhelage zur Seite gedreht wird. Als Extremfall betrachte man einen im Raum waagrecht liegenden Stab. Die beiden Pendel an den Enden hängen nach unten und sind in Ruhe. Wird ein Pendel zur Seite in Richtung des Stabes ausgelenkt, ist keine Ausregelung der Schwingung möglich, ohne dass das andere Pendel zur Schwingung angeregt wird. Damit ist offensichtlich, dass $\mathbf{x}_0 = \mathbf{0}$ der beste Arbeitspunkt für die Entwicklung der Matrizen ist und, dass die hier vorgestellte Regelung bei großen Schräglagen des Stabes bezüglich seiner Ruhelage an ihre Grenzen stößt.

Anschließend werden mit Hilfe eines MATLAB-Skripts nach der Feststellung der Steuerbarkeit die Reglermatrizen für das System berechnet. Im Anhang A.3 befindet sich das Skript mit allen System- und Gewichtungsmatrizen sowie sämtlichen Berechnungsschritten des Reglers. Im Folgenden werden nur die in Abbildung 6.2 dargestellten EWK der Systemmatrix \mathbf{A} und des Zustandsreglers $\mathbf{A} - \mathbf{BK}$ diskutiert. Ab hier werden die Bezeichnungen \mathbf{A} und \mathbf{B} für die zeitunabhängigen Matrizen verwendet. Die zeitabhängigen werden im Folgenden mit $\mathbf{A}(t)$ und $\mathbf{B}(t)$ bezeichnet.

Abbildung 6.2 links skizziert die EWK der Matrix \mathbf{A} des dynamischen Systems. Die Eigenwerte $\lambda_{1,3,5,7} = 3.1305i$ und $\lambda_{2,4,6,8} = -3.1305i$ sind rein imaginär und liegen symmetrisch um die reelle Achse. Diese EWK charakterisiert ein um eine Ruhelage stabil schwingendes System. Ein Vergleich der hier vorliegenden EWK mit der eines einfachen Pendels (vgl. Abbildung 4.2 (a)) verdeutlicht, dass sich die Ordnung der Eigenwerte verdoppelt, die Lage aber gleich bleibt. Dies ist leicht nachvollziehbar, denn es handelt sich hierbei um ein dynamisches System mit zwei identischen Pendeln gleicher Länge $l = l_1 = l_2 = 1$ m.

Die Ordnung des zehnfachen Eigenwerts $\lambda_{9,\dots,18} = 0$ erhöht sich auf zehn. Dies hängt damit zusammen, dass die Position und die Orientierung des Stabes durch fünf Koordinaten eindeutig beschrieben ist. Das sind die Position des Aufhängepunkts des ersten Pendels und die Koordinaten α_d und β_d , welche die Position des zweiten Aufhängepunkts im blau markierten KS (α, β, γ) in Abbildung 6.1 angeben.

Bei der Angabe der Eigenwerte des Zustandsreglers in Abbildung 6.2 wurde aus Platzgründen darauf verzichtet, die genauen Zahlenwerte anzugeben. Die genauen Zahlen können mit Hilfe des MATLAB-Skripts im Anhang A.3 jederzeit für beliebige Längen l_1 , l_2 und d berechnet werden. Entscheidend für die Stabilität des Reglers ist ohnehin die relative Lage der Eigenwerte bezüglich der imaginären Achse.

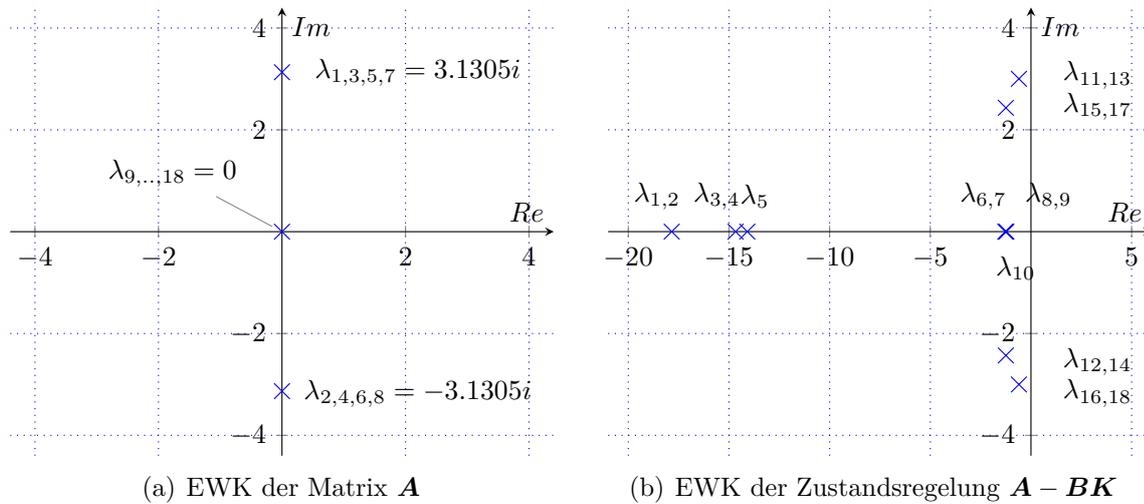


Abbildung 6.2.: EWK des Systems zweier Pendel an Enden eines Stabes:

(a) EWK der Matrix \mathbf{A} mit $l_1 = l_2 = 1$ m, $d = 2$ m und $g = 9.8$ m/s²: die Eigenwerte $\lambda_{1,3,5,7}$ und $\lambda_{2,4,6,8}$ sind rein imaginär und liegen symmetrisch um die reelle Achse. Diese EWK charakterisiert ein stabil schwingendes System. Im Vergleich zum einfachen Pendel verdoppelt sich die Anzahl der imaginären Eigenwerte.

(b) EWK der Zustandsregelung $\mathbf{A} - \mathbf{BK}$: Sämtliche Eigenwerte $\lambda_{1,\dots,18}$ liegen links der imaginären Achse somit ist der berechnete Regler stabil. Alle Berechnungsschritte können mit dem MATLAB-Skript im Anhang A.3 nachvollzogen werden.

6.4. Simulationen und Simulationsergebnisse

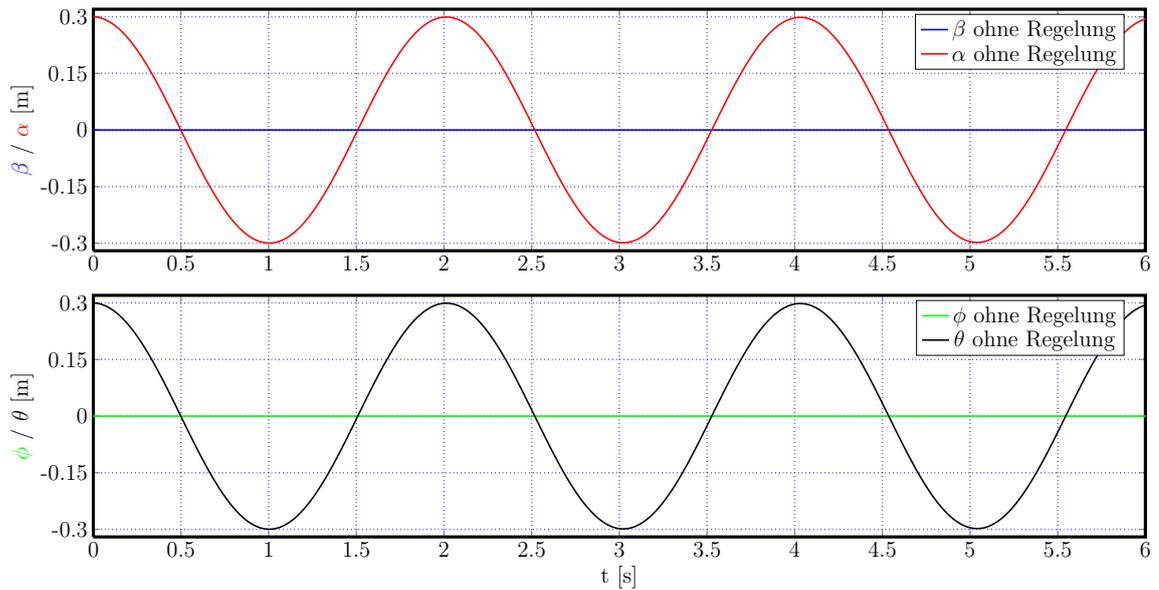
Im Folgenden werden Simulationen des physikalischen Modells aus Abbildung 6.1 in zwei Stufen vorgestellt. Erst wird eine Simulation des Modells als Simulink-Modell und anschließend eine Abbildung mit Hilfe der Physik-Engine Bullet präsentiert.

6.4.1. Modellsimulation in Simulink

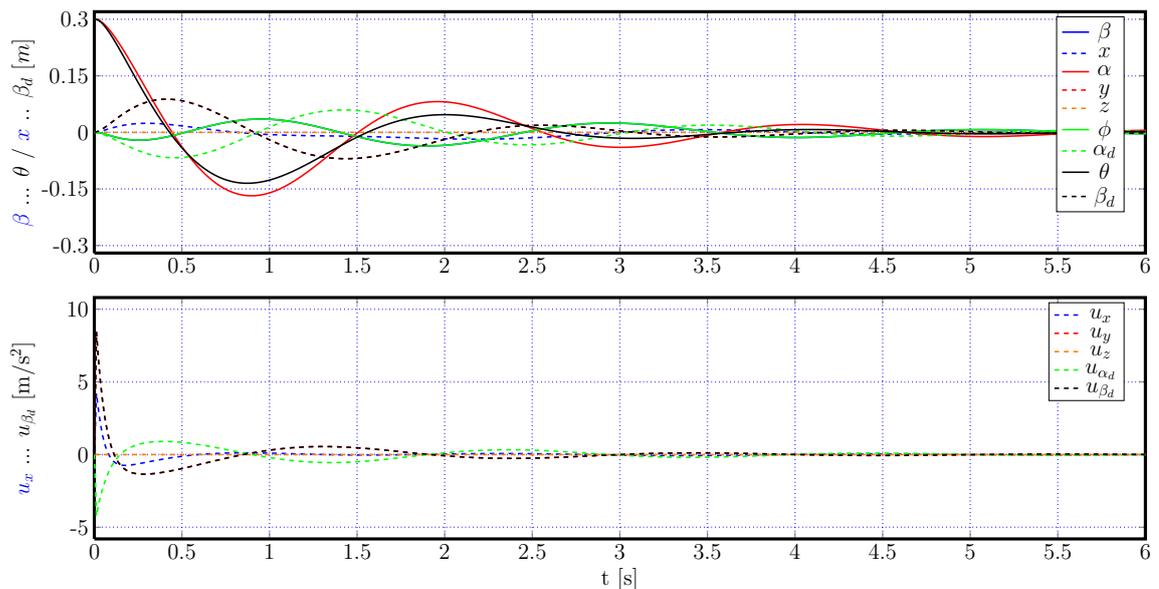
In Abbildungen im Anhang B.1 und B.2 ist ein Simulink-Modell mit einem Untersystem des in Abbildung 6.1 dargestellten physikalischen Modells gezeigt. Das Simulink-Modell ist in der gleichen Weise strukturiert wie das Modell des einfachen Pendels. Die Beschreibung vom Aufbau des Systems gilt auch für dieses Modell (vgl. Abschnitt 4.5.1). Das Untersystem 'Physikalisches Modell' unterscheidet sich von dem in Abbildung 4.8 in den Dimensionen des Zustandsvektors \mathbf{x} (hier 18) und des Steuersignals \mathbf{u} (hier 5). Zum Inhalt des Untersystems kommen zwei weitere Bewegungsgleichungen (6.6) hinzu, welche die Bewegung des zweiten Pendels (l_2, m_2) beschreiben.

In Abbildungen 6.3 und 6.4 werden die Ergebnisse von drei Simulationsversuchen zusammengefasst. Abbildung 6.3 (a) zeigt ungedämpfte Schwingungen der beiden Pendel l_1 und l_2 , die durch die Anfangswerte $\alpha_0 = \theta_0 = 0.3$ m angeregt werden. Das Pendel

6. Transport von zwei Pendeln



(a) Ungedämpfte Schwingung der Pendel 1 bzw. 2 in α - bzw. θ -Richtung



(b) Ausgangssituation wie in (a), Schwingungen werden ausgegelt

Abbildung 6.3.: Simulationsergebnisse zweier Pendel in Simulink, Teil 1:

(a) zeigt ungedämpfte Schwingungen in Richtungen α (oberes Diagramm) bzw. θ (unteres Diagramm), die durch Anfangsauslenkungen $\alpha_0 = \theta_0 = 0.3$ m angeregt wird.

(b) zeigt den Vorgang der Stabilisierung der beiden Pendel mit Anfangswerten wie in (a) um den Ursprung des Welt-KS. Im oberen Diagramm sind die Auslenkung der Pendel und die Bewegung der Aufhängepunkte ($\alpha, \beta, \phi, \theta, x, y, z, \alpha_d, \beta_d$) und im unteren das Steuersignal $\mathbf{u} = (\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \ddot{\alpha}_d, \ddot{\beta}_d)^T$ eingezeichnet.

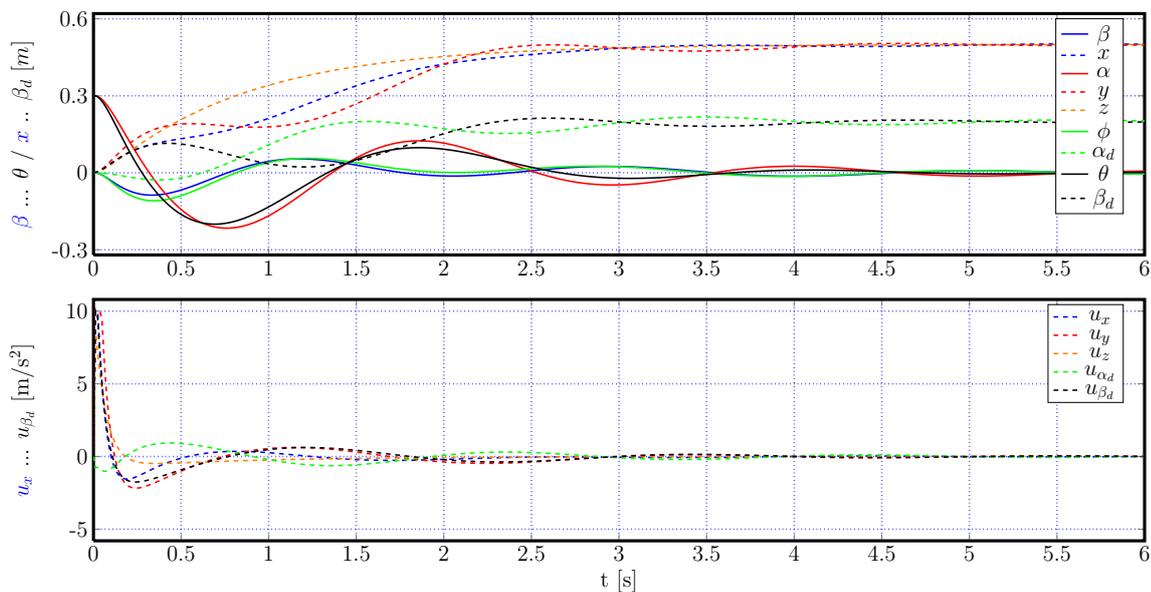


Abbildung 6.4.: Simulationsergebnisse zweier Pendel in Simulink, Teil 2: Überlagerung aus einem Transport- und einem Stabilisierungsvorgang mit Anfangswerten wie in Abbildung 6.3 (a) und (b). Der Transport erfolgt aus dem Ursprung des Welt-KS in den Punkt $(x = 0.5, y = 0.5, z = 0.5, \alpha_d = 0.2, \beta_d = 0.2)^T$ m.

1 schwingt dabei in Richtung α (oberes Diagramm) und das Pendel 2 in Richtung θ (unteres Diagramm). Die beiden Schwingungsebenen stehen senkrecht aufeinander, um den Stabilisierungsvorgang für spätere Versuche zu erschweren. Die beiden anderen Schwingungsrichtungen β und ϕ bleiben für die Dauer des ersten Versuchs unverändert auf null. Der Zustandsregler ist in diesem Versuch von dem physikalischen System abgekoppelt und das System ist sich selbst bzw. der Schwerkraft überlassen.

Abbildung 6.3 (b) zeigt einen Versuch bei dem die Schwingungen der beiden Pendel unterdrückt werden. Die Anfangsbedingungen sind wie in (a): $\alpha_0 = \theta_0 = 0.3$ m und alle anderen Elemente des Zustandsvektors gleich Null. Die Bewegung der Aufhängepunkte x, y, z, α_d und β_d sind gestrichelt, die Auslenkungen der Pendel α, β, ϕ und θ als durchgezogene Linie eingezeichnet. Die Anfangsauslenkung wird innerhalb von ca. 4 s unterdrückt. Der Verlauf von y (rot gestrichelt) und β_d (schwarz gestrichelt) decken sich, da die Anfangsbedingungen gleich und die anschließenden Schwingungen sehr ähnlich sind. Die durch die Ausgleichsbewegung angeregte Schwingungen in β (blau durchgezogen) und ϕ (grün durchgezogen) liegen in der Darstellung ebenfalls übereinander. Es fällt auf, dass wie schon beim einfachen Pendel und im Gegensatz zum inversen Pendel die Bewegung der Gelenkpunkte deutlich unter dem Ausschlag der Pendel bleibt. Dies ist eine Eigenschaft eines stabilen physikalischen Systems.

Im unteren Diagramm der Abbildung 6.3 ist der fünfdimensionale Steuervektor \mathbf{u} dargestellt. Die Verläufe von u_y (rot) und u_{β_d} (schwarz) liegen aufgrund der gleichen

Anfangsbedingungen exakt übereinander und zeigen am Anfang der Bewegung den größten Spitzenwert von knapp 9 m/s^2 . Deutlich darunter mit ca. $\pm 4 \text{ m/s}^2$ liegen die Spitzenwerte von u_x (blau) und u_{α_d} (grün). Der Hintergrund des unterschiedlichen Vorzeichens ist der, dass das Ausgleichssignal u_x für das zweite Pendel durch u_{α_d} kompensiert werden muss. Gestrichelt orange ist der zur z -Koordinate gehörende Verlauf von u_z gezeigt.

Abbildung 6.4 zeigt eine Überlagerung aus einem Transport und einem Stabilisierungsvorgang mit Anfangswerten wie in Abbildung 6.3 (a) und (b). Der Transport erfolgt aus dem Punkt $(x = 0, y = 0, z = 0, \alpha_d = 0, \beta_d = 0)^T \text{ m}$ in den Punkt $(x = 0.5, y = 0.5, z = 0.5, \alpha_d = 0.2, \beta_d = 0.2)^T \text{ m}$. D. h. der Aufhängepunkt 1 befindet sich im Startpunkt, wie in den Versuchen davor im Ursprung des Welt-KS und der Verbindungsstab zum Aufhängepunkt 2 ist senkrecht nach unten gerichtet. Im Zielpunkt befindet sich der Aufhängepunkt 1 im Raumpunkt $(x = 0.5, y = 0.5, z = 0.5)^T \text{ m}$ und der Verbindungsstab ragt in den positiven Oktanten $(+, +, +)$ des blau markierten KS, so dass die Projektionen des Aufhängepunkts 2 $\alpha_d = \beta_d = 0.2 \text{ m}$ betragen. Wie gewohnt sind im oberen Diagramm die Bewegungen der Aufhängepunkte gestrichelt, die Pendelauslenkungen als durchgezogene Linie eingezeichnet. Wie beim einfachen und inversen Pendel ist die Verschiebung in z -Richtung (orange) sehr direkt. Der Verlauf von x (blau) wird von einer Ausgleichsbewegung überlagert, die bei y (rot) aufgrund der Anfangsauslenkung in α -Richtung stärker ausgeprägt ist. Die Schwingungen im Verlauf von α_d und β_d sind im Vergleich zur Bewegung des Aufhängepunkts 1 noch deutlich stärker. Dies liegt daran, dass die Bewegung des Aufhängepunkts 1 für das Pendel 2 durch Gegenbewegungen ausgeglichen werden muss. Das ist daran zu sehen, dass y und α_d wie schon beim Stabilisierungsvorgang gegenphasig verlaufen. Am Verlauf der durchgezogenen Linien wird deutlich, dass die Anfangsauslenkung $\alpha_0 = \theta_0 = 0.3 \text{ m}$ (rot und schwarz) und die durch den Transport angeregte Schwingung in β (blau) und ϕ (grün) sehr schnell unterdrückt werden und der Transportvorgang ohne größere Ausschläge der Pendel innerhalb von ca. 4 s abgeschlossen wird.

Das untere Diagramm der Abbildung 6.4 zeigt wieder das Steuersignal \mathbf{u} . Die Spitzenwerte von u_x , u_y und u_{β_d} sind am Anfang der Bewegung durch den maximalen Wert $a_{max} = 10 \text{ m/s}^2$ beschränkt. u_z liegt knapp darunter. Wie oben diskutiert ergibt sich aufgrund dessen, dass die Bewegung des Aufhängepunkts 1 für das Pendel 2 kompensiert werden muss, für β_d am Anfang ein kleiner Wert.

6.4.2. Physikalische Nachbildung und Simulation zweier Pendel an den Enden eines Stabes in Bullet

In diesem Abschnitt wird der berechnete Regler an einem physikalischen System, das als Bullet-Modell implementiert wurde, getestet. Ein Ausschnitt aus der graphischen Darstellung des physikalischen Modells ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Das Modell besteht aus zwei 0.5 m langen unsichtbaren Stangenpendel, deren Aufhängepunkte

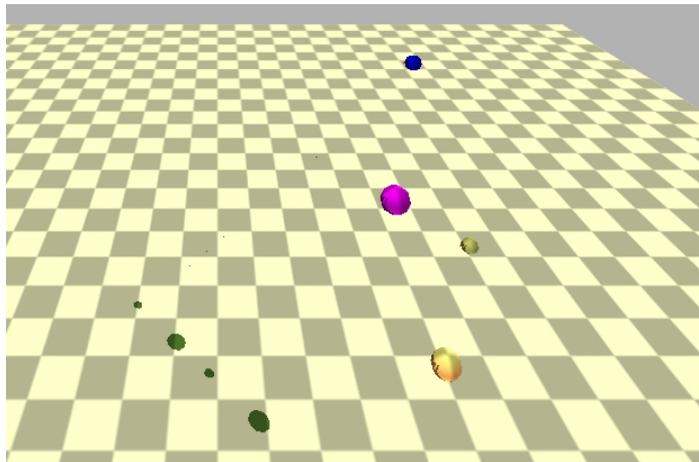


Abbildung 6.5.: Ein Ausschnitt aus der graphischen Darstellung zweier Pendel an Enden eines Stabes als Bullet-Modell. Kleine Kugeln markieren die Enden des unsichtbaren Stabes, die als Aufhängepunkte für die beiden größeren Pendelkörper dienen. Den Hintergrund bildet eine in den Raum platzierte Bodenplatte. Das System befindet sich im Zustand $p = (x = 1.0, y = 0.6, z = 0.2, \alpha_d = 0.3, \beta_d = 0.3)^T$ m, die beiden Pendel sind in Ruhe.

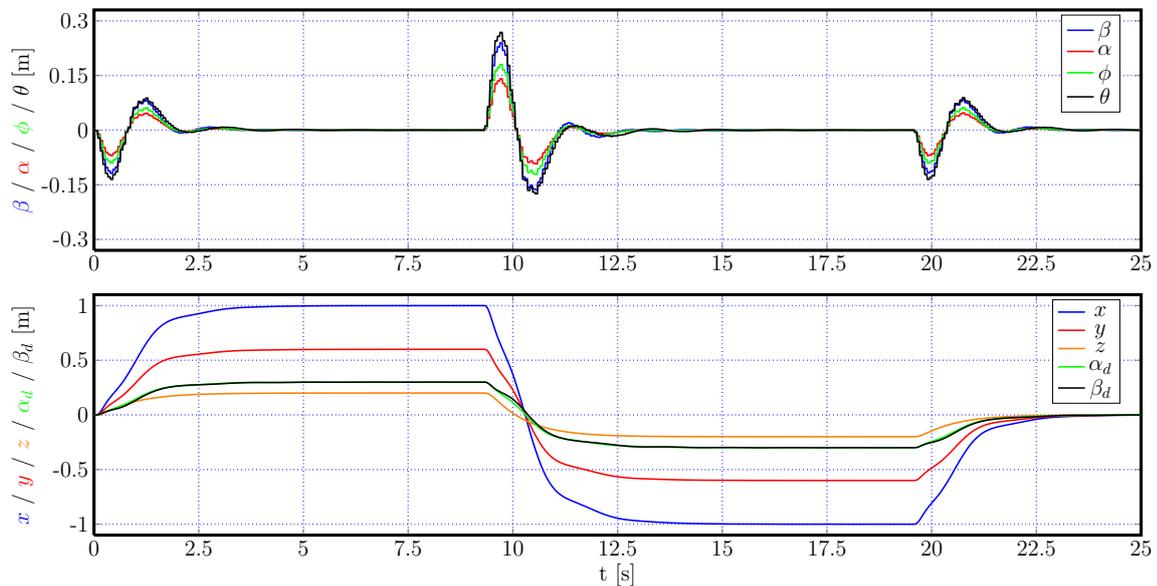


Abbildung 6.6.: Ergebnisse eines Transportexperiments zweier Pendel an den Enden eines Stabes. Im oberen Teildiagramm sind die Bewegungen der Pendel zusammengefasst, im unteren die Bahnen der Aufhängepunkte.

durch einen unsichtbaren Stab der Länge 0.6 m verbunden sind. Die Aufhängepunkte sind mit kleineren Kugeln markiert, die großen Kugeln dienen als Pendelkörper. Vor dem Hintergrund einer Bodenplatte schwebt das dynamische System im Raum. Geregelt wird das Modell durch einen in Simulink implementierten Riccati-Regler, der bis auf die Dimensionen des Systems dem in Abbildung 4.11 (b) entspricht. Der Datenaustausch zwischen der Physik-Simulation und dem Simulink-Regler erfolgt wie bei allen Physik-Simulationen über einen gemeinsamen Speicherbereich (vgl. Abbildung 4.11 (c)).

Abbildung 6.6 zeigt die Ergebnisse eines Transportexperiments. Oben sind die Pendelbewegungen mit α , β , ϕ und θ dargestellt und unten die Verschiebung der Aufhängepunkte x , y , z , α_d und β_d . Der Transport verläuft aus dem Ruhezustand über den Punkt $p = (x = 1.0, y = 0.6, z = 0.2, \alpha_d = 0.3, \beta_d = 0.3)^T$ m und $-p$ wieder in den Ruhezustand zurück. Beim Transport wird an jedem Zielpunkt jeweils ein Stillstand des Systems abgewartet. Die Farben in der Darstellung sind so gewählt, dass die Schwingungsrichtung, z. B. α und die dazugehörige Bewegungsrichtung y in gleicher Farbe (hier rot) gezeichnet sind. Welche Bewegungsrichtung zu welcher Schwingungsrichtung gehört, ist am besten aus der Skizze des physikalischen Modells in Abbildung 6.1 zu erkennen. Die maximale Auslenkung der Pendel skaliert mit dem zurückgelegten Transportweg. Den größten Ausschlag zeigt die Schwingungsrichtung θ . Der Transportweg in diese Schwingungsrichtung setzt sich aus den Achsenrichtungen $x + \beta + \theta_d$ zusammen. α wird dagegen nur in Richtung y transportiert. Die Werte der Pendelbewegung haben im Gegensatz zum inversen Pendel (vgl. Abbildung 5.3 oben) wieder die bekannte Stufenform. Daraus lässt sich schließen, dass dieses System mit dem in dieser Arbeit präsentierten experimentellen Aufbau ohne Probleme geregelt werden kann.

7. Transport einer Kugel auf einem Tablett

Mit dem vorhergehenden Abschnitt wurde das Thema hängende Lasten abgeschlossen. In diesem Kapitel werden an einem völlig anderen Transportsystem ebenfalls Trägheitskräfte untersucht, die aber auf eine andere Weise zum Ausdruck kommen. Hier wird eine auf einem Tablett frei rollende Kugel modelliert. Wirkt auf die Kugel eine Kraft, die eine Komponente tangential zur Tabletoberfläche hat, dann beginnt die Kugel auf dem Tablett zu rollen. Schafft man es die Kugel beim Transport gezielt an einer Stelle platziert zu halten, so hat man Querkräfte minimiert.

Bei bestimmten Arten von Transport ist es sinnvoll Querkräfte zu vermeiden. Man denke dabei an einen Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern oder an einen Sauggreifer, der in der Richtung normal zur Saugfläche deutlich stärker belastet werden kann als quer dazu.

Ziel dieses Kapitels ist es am Modell einer Kugel auf einem Tablett die Entstehung der Querkräfte zu verstehen und sich diese zu Nutze zu machen. Hier wird der gezielte Umgang mit den Querkräften präsentiert. Unter anderem wird in diesem Kapitel anhand von Simulationsexperimenten der Einfluss der Gewichtungsmatrix \mathbf{Q} auf die Transportperformance untersucht. Im nachfolgenden Kapitel wird das hier behandelte Modell für den Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern erfolgreich eingesetzt.

7.1. Aufbau des physikalischen Modells

In Abbildung 7.1 ist ein Vorschlag des physikalischen Modells einer auf einem Tablett rollenden Kugel skizziert. Im Gegensatz zu oben behandelten Fällen des Transports von hängenden Lasten spielt in diesem Fall nicht nur die Verschiebung des Tablett, sondern auch seine Orientierung eine wichtige Rolle. Die Orientierung des blau gestrichelt markierten Tablett wird relativ zum raumfesten Welt-KS (x_w, y_w, z_w) durch die Winkel α und β beschrieben. Die Reihenfolge der Drehungen ist wie folgt: erst wird um den Winkel β um die y -Achse gedreht und anschließend um den Winkel α um die neue x -Achse. Damit ist die Orientierung des Tablett in einer eindeutigen Weise beschrieben. In Abbildung 7.1 können die Drehungen des Tablett-KS nachverfolgt werden. Der Zustand des Tablett-KS vor den Drehungen ist mit schwarzen Punkten markiert, grün gestrichelt wird die Orientierung mit den Achsenbezeichnungen x' , y' und z' nach der ersten Drehung angedeutet und blau gestrichelt erscheint das Tablett (x'', y'', z'')

nach der zweiten Drehung. Streng genommen deutet das blau gestrichelte Rechteck eine zur Tabletoberfläche parallele Ebene durch den Mittelpunkt der Kugel an. Im Falle einer infinitesimal kleinen Kugel ($r \rightarrow 0$) fallen die beiden Ebenen zusammen. Der Mittelpunkt des Tablett wird im Welt-KS durch den Ortsvektor r festgelegt, der Mittelpunkt der Kugel durch r_b . Die Koordinaten der Kugel im Tablett-KS werden mit x_b'' und y_b'' beschrieben. Auf eine z -Koordinate im Tablett-KS wird bei der Beschreibung der Kugel auf dem Tablett verzichtet. Es wird davon ausgegangen, dass die Kugel immer auf der Tabletoberfläche, ohne den Kontakt zu verlieren, abrollt. Die Kugel mit der Masse m und dem Radius r ist in der Zeichnung mit einer roten Sphäre markiert. g zeigt hier in die negative z_w -Richtung.

7.2. Ableitung der Bewegungsgleichungen

Im Folgenden werden auf der Basis des in Abbildung 7.1 präsentierten Modells Bewegungsgleichungen abgeleitet. Diese beschreiben das Verhalten der Kugel auf dem Tablett in Abhängigkeit von allen relevanten Größen. Es wird in gewohnter Weise die Lagrangefunktion L aufgestellt

$$L = T - V \tag{7.1}$$

$$= \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{r}}_b^2 + \underbrace{\frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}'' \boldsymbol{\Theta} \boldsymbol{\omega}''}_{\text{Rotationsenergie}} - mgz_b \tag{7.2}$$

$$= \frac{1}{2} m (\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2 + \dot{z}_b^2) + \frac{1}{2} \frac{\Theta}{r^2} (\dot{x}_b''^2 + \dot{y}_b''^2) - mgz_b. \tag{7.3}$$

m und r bezeichnen die Masse bzw. den Radius der Kugel. Die kinetische Energie der Kugel setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Ein Teil resultiert aus der linearen Bewegung der Kugel und ein zweiter aus ihrer Rotationsenergie. Da bei einer Kugel aufgrund der Raumsymmetrie die Trägheitsmomente um alle Achsen gleich sind, ist der Trägheitstensor $\boldsymbol{\Theta}$ eine Diagonalmatrix der Dimension drei mit $\Theta_{11} = \Theta_{22} = \Theta_{33} = \frac{2}{5}mr^2$. Setzt man voraus, dass die Kugel schlupffrei auf dem Tablett abrollt, dann gelten zwischen der linearen und der Winkel-Geschwindigkeit der Kugel die Beziehungen: $\dot{x}_b'' = r\omega_{y''}$ und $\dot{y}_b'' = r\omega_{x''}$. $\dot{z}_b'' = 0$, da die Kugel, wie oben angenommen, nicht von der Tabletoberfläche abhebt. Damit lässt sich der Schritt von (7.2) nach (7.3) nachvollziehen.

Des Weiteren sind in (7.3) folgende Beziehungen bzw. ihre jeweiligen Zeitableitungen einzusetzen

$$\begin{aligned} x_b &= x - x_b'' \cos(\beta), \\ y_b &= y + y_b'' \cos(\alpha) + x_b'' \sin(\beta) \sin(\alpha), \\ z_b &= z - y_b'' \sin(\alpha) + x_b'' \sin(\beta) \cos(\alpha). \end{aligned} \tag{7.4}$$

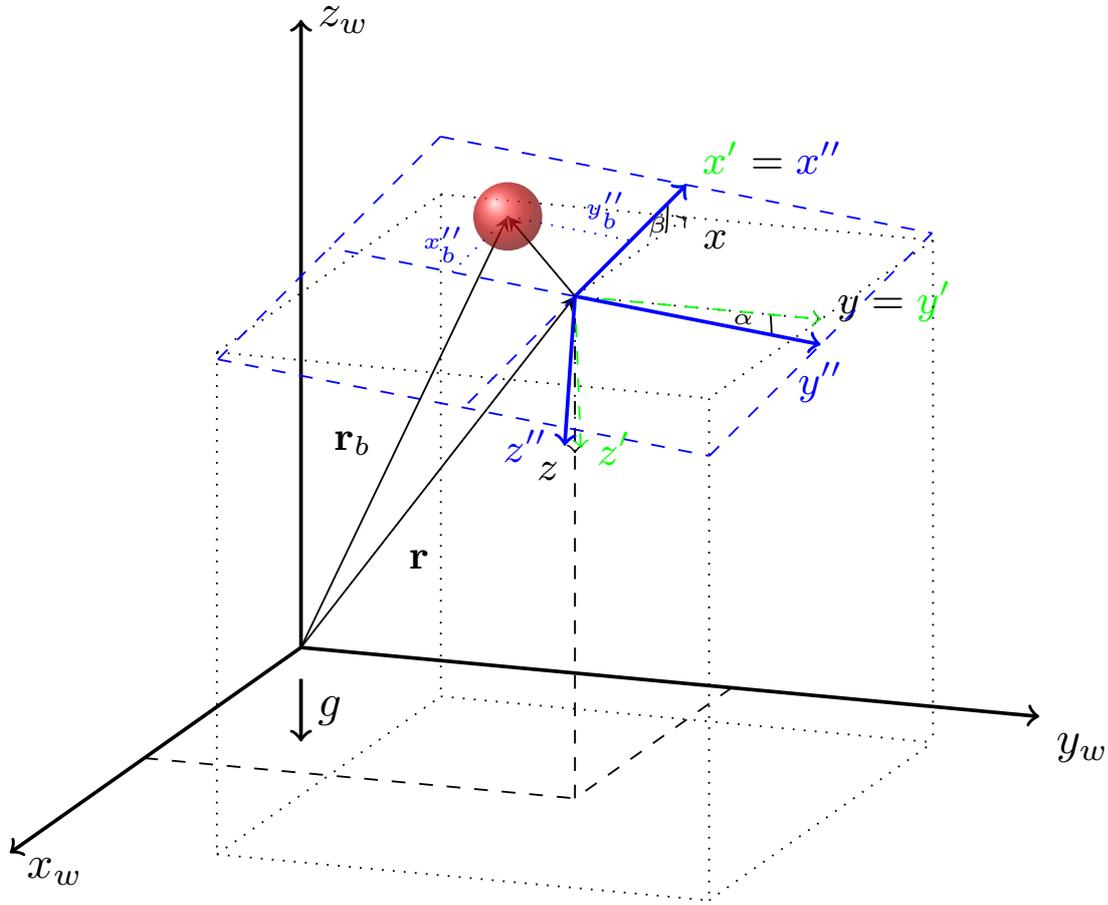


Abbildung 7.1.: Physikalisches Modell einer auf einem Tablett rollenden Kugel

Diese ergeben sich durch Ausmultiplizieren der Drehmatrizen für die oben beschriebenen Drehungen.

Im nächsten Schritt werden nach der Vorschrift (4.5) mit $q_1 = x''_b$ und $q_2 = y''_b$ aus (7.3) die Bewegungsgleichungen abgeleitet

$$\begin{aligned} \ddot{x}''_b = \frac{5}{7} & \left(\cos(\beta)\ddot{x} - \sin(\alpha)\sin(\beta)\ddot{y} - \cos(\alpha)\sin(\beta)\ddot{z} + \sin(\beta)y_b\ddot{\alpha} \right. \\ & \left. + \dot{\beta}^2 x_b - \dot{\alpha}^2 \cos^2(\beta)x_b + \dot{\alpha}^2 x_b + 2\dot{\alpha}\sin(\beta)\dot{y}_b - \cos(\alpha)\sin(\beta)g \right), \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}''_b = \frac{5}{7} & \left(-\cos(\alpha)\ddot{y} + \sin(\alpha)\ddot{z} - \sin(\beta)x_b\ddot{\alpha} \right. \\ & \left. + \dot{\alpha}^2 y_b - 2\dot{\alpha}\sin(\beta)\dot{x}_b - 2\dot{\alpha}\dot{\beta}\cos(\beta)x_b + \sin(\alpha)g \right). \end{aligned} \quad (7.6)$$

Die DGL (7.5) und (7.6) sind im Gegensatz zu den Bewegungsgleichungen von hän-

genden Lasten offensichtlich nicht symmetrisch in den Variablen x/y bzw. α/β . Dies hängt damit zusammen, dass die Reihenfolge der Drehungen um die Winkel α und β zur Anpassung der Tabletorientierung nicht vertauschbar sind (vgl. 7.1). Die Richtigkeit der Vorzeichen im Modell lässt sich am ersten Summanden in den Gleichungen (7.5) und (7.6) schnell testen. Setzt man in der Gleichung (7.6) $\beta = 0$ und $x_b = 0$ dann ergibt sich die Beziehung $\ddot{x}_b'' = \frac{5}{7}\ddot{x}$. Das bedeutet, dass wenn der Mittelpunkt des Tablett in die positive x_w -Richtung beschleunigt wird, erfährt die Kugel auf dem Tablett eine Beschleunigung in die positive x'' -Richtung. Dies erscheint aufgrund der Trägheit der Kugel richtig. In der Gleichung (7.6) kommt man in ähnlicher Weise zum gleichen Ergebnis wenn man berücksichtigt, dass die KS-Achsen y_w und y'' entgegengesetzte Richtungen haben.

Auf der Basis der Bewegungsgleichungen (7.5) und (7.6) lässt sich ein Riccati-Regler berechnen.

7.3. Mathematische Ableitung eines Riccati-Reglers

Eine eindeutige Beschreibung des Systems einer Kugel auf einem Tablett ist mit folgenden Größen gegeben

$$\mathbf{x} = \left(x_b'', \dot{x}_b'', y_b'', \dot{y}_b'', \alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z} \right)^T \quad (7.7)$$

und

$$\mathbf{u} = \left(\ddot{\alpha}, \ddot{\beta}, \ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z} \right)^T. \quad (7.8)$$

\mathbf{x} ist hier der Zustands- und \mathbf{u} der Steuervektor des Systems. Die ersten vier Elemente in (7.7) beschreiben die Bewegung der Kugel auf dem Tablett, α und β samt Zeitableitungen die Orientierung und Orientierungsänderung des Tablett und die letzten sechs, wie gewohnt die Bewegung des Tablett im Raum. Die Bedeutung des Steuervektors ist ebenfalls selbsterklärend: die ersten zwei Komponenten bezeichnen die Winkelbeschleunigung des Tablett und die letzten drei seine lineare Beschleunigung. Alle Bezeichnungen beziehen sich auf die Abbildung 7.1.

Da sich die Linearisierung sehr einfach nach (4.13) und (4.14) nachvollziehen lässt, wird hier auf eine ausführliche Ableitung der linearisierten Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} verzichtet. Es ist naheliegend als Entwicklungspunkt den Arbeitspunkt $\mathbf{x}_0 = \mathbf{0}$ zu wählen. In diesem Zustand ist die Kugel in der Mitte des ruhenden, waagrecht orientierten Tablett in Ruhe. Das Tablett befindet sich im Nullpunkt des Welt-KS.

Im Folgenden wird hier für das System eine Kugel auf einem Tablett ein Zustandsregler berechnet. Alle System- und Gewichtungsmatrizen sowie sämtliche Berechnungsschritte des Zustandsreglers und die Berechnung der Steuerbarkeit sind in einem MATLAB-Skript im Anhang A.4 zusammengefasst. Damit lässt sich die Berechnung, mit eventueller Anpassung der Gewichtungsmatrizen jederzeit wiederholen. Hier wird mit Hilfe der EWK der Systemmatrix \mathbf{A} und des Zustandsreglers $\mathbf{A} - \mathbf{BK}$

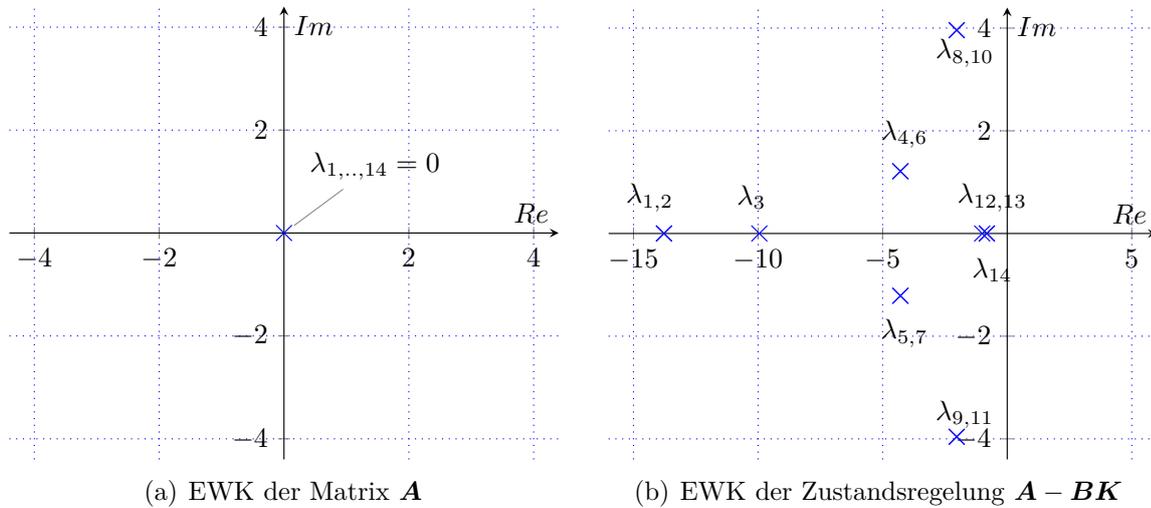


Abbildung 7.2.: EWK des Systems einer Kugel auf einem Tablett:

- (a) EWK der Matrix \mathbf{A} des Systems eine frei rollende Kugel auf einem Tablett. Alle 14 Eigenwerte $\lambda_{1,\dots,14} = 0$. Die EWK charakterisiert hier ein stabiles System: die Kugel bleibt auf einem waagrecht orientierten Tablett in Ruhe liegen.
- (b) EWK der Zustandsregelung $\mathbf{A} - \mathbf{BK}$: sämtliche Eigenwerte $\lambda_{1,\dots,14}$ liegen links der imaginären Achse. Somit ist der berechnete Regler stabil.

anhand der Abbildung 7.2 die Stabilität des linearisierten Systems und des Riccati-Reglers diskutiert. Links ist die EWK der linearisierten Systemmatrix \mathbf{A} dargestellt. Sämtliche der 14 Eigenwerte des unregulierten Systems $\lambda_{1,\dots,14} = 0$. Diese Konfiguration charakterisiert ein stabiles schwingungsfreies System. Die Kugel bleibt auf einem waagrecht ausgerichteten Tablett in Ruhe liegen. Das rechte Teilbild zeigt sämtliche der 14 Eigenwerte der Zustandsregelung links der imaginären Achse. Die Zahlenwerte sind hier der Übersichtlichkeit wegen weggelassen und können mit dem MATLAB-Skript im Anhang A.4 jederzeit nachgerechnet werden. Für die Stabilität des Riccati-Reglers ist ohnehin nur die relative Lage bezüglich der imaginären Achse interessant. Somit ist der berechnete Regler stabil und einsatzbereit.

7.4. Experimenteller Aufbau

7.4.1. Roboter und Tablettkonstruktion

Für Experimente wurde der aus Abbildung 4.4 (a) bekannte Roboter verwendet. Dieser wurde um eine Tablettkonstruktion (vgl. Abbildung 7.3 (a) und (b)) erweitert. Das Tablett wird von ca. 25 cm langen Aluminiumstäben an der Seite unterhalb des TCP gehalten. Um einen schnellen Wechsel der Versuchsaufbauten (Pendel \leftrightarrow Tablett) zu ermöglichen, bleibt die Befestigungsplatte für die Pendelaufhängung an der Kamera

festgeschraubt. Die Kamera wird mit Hilfe eines anderen Halterungswinkels mittig über dem Tablett befestigt. An der Befestigung und der zur Kamera relativen Position der LED ändert sich nichts. Auch die Beobachtung der Kugelposition erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie beim Pendel nur ohne den Einsatz eines Reflektors. Unterhalb des Tablettts ist ein Aluminiumwinkel der Breite 8 cm angebracht. Dieser bildet ein weiteres in der Höhe verstellbares Tablett, um Behälter mit Flüssigkeiten zu transportieren. Der Transport von offenen Behältern mit Flüssigkeiten wird in Kapitel 8 behandelt.

7.4.2. Optischer Sensor und Bildbearbeitung

Durch die unveränderte relative Position der IR-LED zur Kamera wird die Kugel von oben in der gleichen Weise wie der Reflektor auf der Oberseite des Pendelkörpers angestrahlt. Die Belichtungszeit und die Intensität der LED werden so eingestellt, dass nur ein starker Reflex auf der Kugelspitze als heller Fleck auf der Aufnahme erscheint (vgl. 7.4 (a)). Dieses Verfahren funktioniert aber nur bei reflektierenden Oberflächen der Kugel, wie z. B. bei einer glänzenden Stahlkugel. Wird eine Kugel mit einer schlecht reflektierenden Oberfläche eingesetzt, können die Intensität der Beleuchtung und die Belichtungszeit der Kamera so angepasst werden, dass der Hintergrund (Tablettoberfläche) überbelichtet wird und als strahlend weißer Hintergrund erscheint. Die Kugel erscheint auf dem hellen Hintergrund als grauer mit Mitteln der Bildbearbeitung leicht zu findender Fleck (vgl. Abbildung 7.4 (b)).

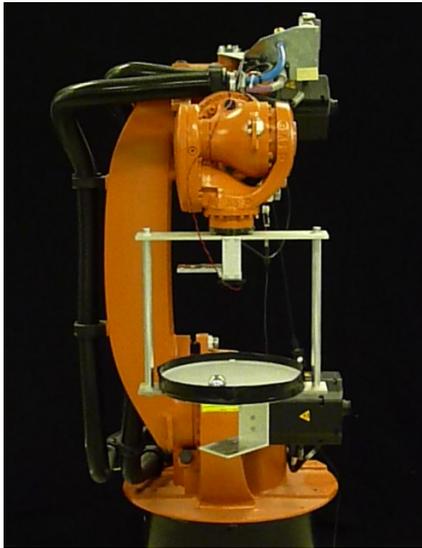
7.4.3. Struktur des Datenaustauschs und der Regelung

Die in Abschnitt 4.4.3 bzw. in Abbildungen 4.6 und 4.7 vorgestellte Struktur des Datenaustauschs und der Regelung wird abgesehen von der Dimension des Reglers ohne Änderungen übernommen. Der ursprünglich in Simulink entwickelte Regler wird auch hier in C/C++ übertragen.

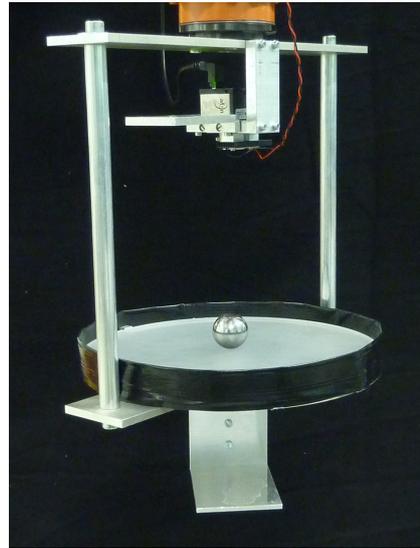
7.5. Simulationen und Simulationsergebnisse

7.5.1. Modellsimulation in Simulink

Abbildungen im Anhang B.3 und B.4 zeigen ein Simulink-Modell des in Abbildung 7.1 vorgestellten physikalischen Systems einer Kugel auf einem Tablett. Die Struktur des Simulink-Modells ist der des in Abschnitt 4.5.1 vorgestellten sehr ähnlich. Es ist um einen Block vor dem Vorfilter ergänzt. Dieser Block dient dazu, die Abweichungen der Kugel aus dem Mittelpunkt des Tablettts bei Transporten auf längere Distanzen (im Bereich von mehr als einem Meter) möglichst klein zu halten. Damit lässt sich auch indirekt die Größe des Tablettts berücksichtigen. Ohne diesen Block könnte der



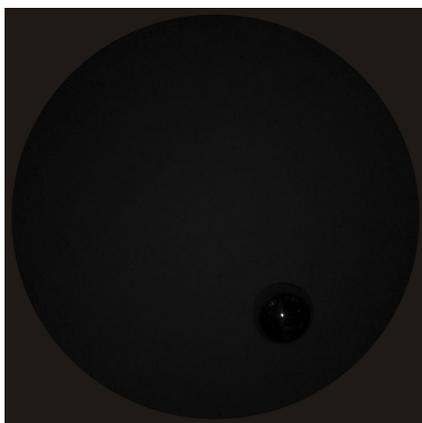
(a) Tablettkonstruktion am Roboter



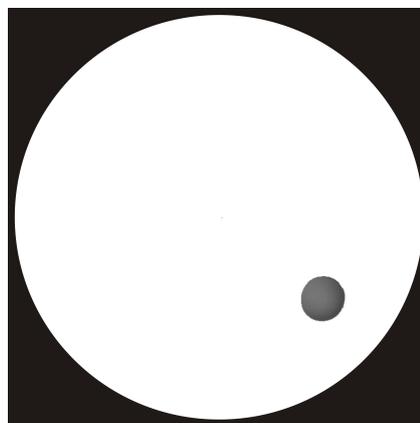
(b) Tablettkonstruktion

Abbildung 7.3.: (a) Roboter KUKA KR-16 mit einer Tablettkonstruktion.

(b) Tablettkonstruktion: Eine ca. 25 cm große Aluminiumscheibe wird seitlich von zwei 25 cm langen Stäben unterhalb des TCP gehalten. Die Observation der Kugel erfolgt nach demselben Prinzip wie beim Pendel. Unterhalb des großen Tablettts ist ein weiteres kleines Tablett für einen Behälter mit Flüssigkeit angebracht.



(a) Unterbelichtete Aufnahme



(b) Überbelichtete Aufnahme

Abbildung 7.4.: Zur Positionsbestimmung können zwei Strategien verfolgt werden:

(a) zeigt eine Vorgehensweise wie beim Pendel: der helle Reflex auf der metallischen Oberfläche der Stahlkugel kann in der Aufnahme leicht gefunden werden.

(b) zeigt eine zu (a) komplementäre Vorgehensweise, die bei nicht-reflektierenden Kugeln zum Einsatz kommt. Durch Erhöhung der Lichtintensität der LED kann eine Überbelichtung des Hintergrunds erreicht werden. Die Kugel erscheint grau auf weißem Hintergrund.

berechnete Regler das Tablett unter Umständen so starken Beschleunigungen aussetzen, dass die Kugel im experimentellen Aufbau vom Tablett herunter fallen könnte. Zur Beschränkung der Vorfiltersignale wird für jedes Signal eine Funktion `distSat` (distance saturation) verwendet. Die Abbildung im Anhang B.3 (b) zeigt den Code der Funktion. Diese hat zwei Eingänge `u1` und `u2`, wobei `u1` die fest vorgegebene Zielposition (vgl. \mathbf{p} in Abbildung 4.3) und `u2` die aktuelle Position der Kugel auf dem Tablett bzw. des Tablettts im Raum ist. Ist die aktuelle Position der Kugel (die ersten zwei Elemente von \mathbf{u}) bzw. die aktuelle Position des Tablettts im Raum (die letzten drei Elemente von \mathbf{u}) von der Zielposition weiter entfernt als die im MATLAB-Skript im Anhang A.4 definierte Schrittweite `xb_max` bzw. `x_max`, dann wird dem Vorfilter \mathbf{V} als Zwischenziel eine

$$\text{Position} = \text{aktuelle Position} + \text{Schrittweite} \cdot \text{Vorzeichen der Zielposition}$$

vorgegeben. Die Vorgabe eines Zwischenziels erfolgt auf diese Weise so lange bis schließlich die Distanz zum Ziel die Schrittweite unterschreitet und der Zielpunkt direkt vorgegeben werden kann. Der vorgestellte Block verlangsamt die Ausführung des Transports. Sein Einsatz ist aber bei kleinen Tablettts unumgänglich, weil sonst die Kugel beim Transport verloren geht.

Im Folgenden werden anhand von drei Diagrammen Simulationsergebnisse des Simulink-Modells vorgestellt. Abbildung 7.5 zeigt einen Versuch bei dem die Kugel aus der Anfangsposition $(x_b'' = 0.08, y_b'' = 0.04)^T$ m in die Position $(x_b'' = 0, y_b'' = 0)^T$ m (Tablettmitte) gefahren wird. Im oberen Diagramm ist die Bewegung der Kugel auf dem Tablett zu sehen. Bei dieser Wahl der Gewichtungsmatrix \mathbf{Q} (vgl. MATLAB-Skript im Anhang A.4) wird die Kugel sehr direkt und ohne Überschwinger in die Zielposition gebracht. Die unteren zwei Diagramme zeigen, dass der Transport der Kugel ein Zusammenspiel aus der Orientierungsänderung des Tablettts (Mitte) und der Tabletttbewegung im Raum (unten) ist. Bei diesem Experiment wird nur die Kugel von einem Punkt des Tablettts zu einem anderen bewegt. Das Tablett ist am Anfang und am Ende des Versuchs waagrecht und im Ursprung des Welt-KS. Der Vorgang dauert hier ca. 4.5 s.

In Abbildung 7.6 ist eine Überlagerung aus einem Transport- und einem Platzierungsvorgang gezeigt. Die Kugel wird von der Tabletttposition $(x_b'' = -0.08, y_b'' = 0.04)^T$ m in die Zielposition $(x_b'' = 0.04, y_b'' = -0.08)^T$ m diagonal, sehr direkt und ohne große Überschwinger bewegt. Gleichzeitig wird das Tablett von dem Ursprung des Welt-KS in die Position $(x = 1.0, y = 0.5, z = 0.2)^T$ m transportiert. Am Verlauf von x (blau) und y (rot) im unteren Diagramm wird an dem fast linearen Anstieg die Wirkung des `distSat`-Blocks deutlich. Die Kugel hat nach ca. 1 s bereits ihre Zielposition auf dem Tablett erreicht, während der Transport des Tablettts ca. 7 s dauert.

Abbildung 7.7 demonstriert die Wirkung unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren der Matrix \mathbf{Q} auf die Zustände x_b'' und y_b'' , α und β , und x , y und z . Hier werden nur $q_{11} = q_{33} = 40/400/4000$ (gestrichelt/durchgezogen/gepunktet), die Gewichtungsfaktoren

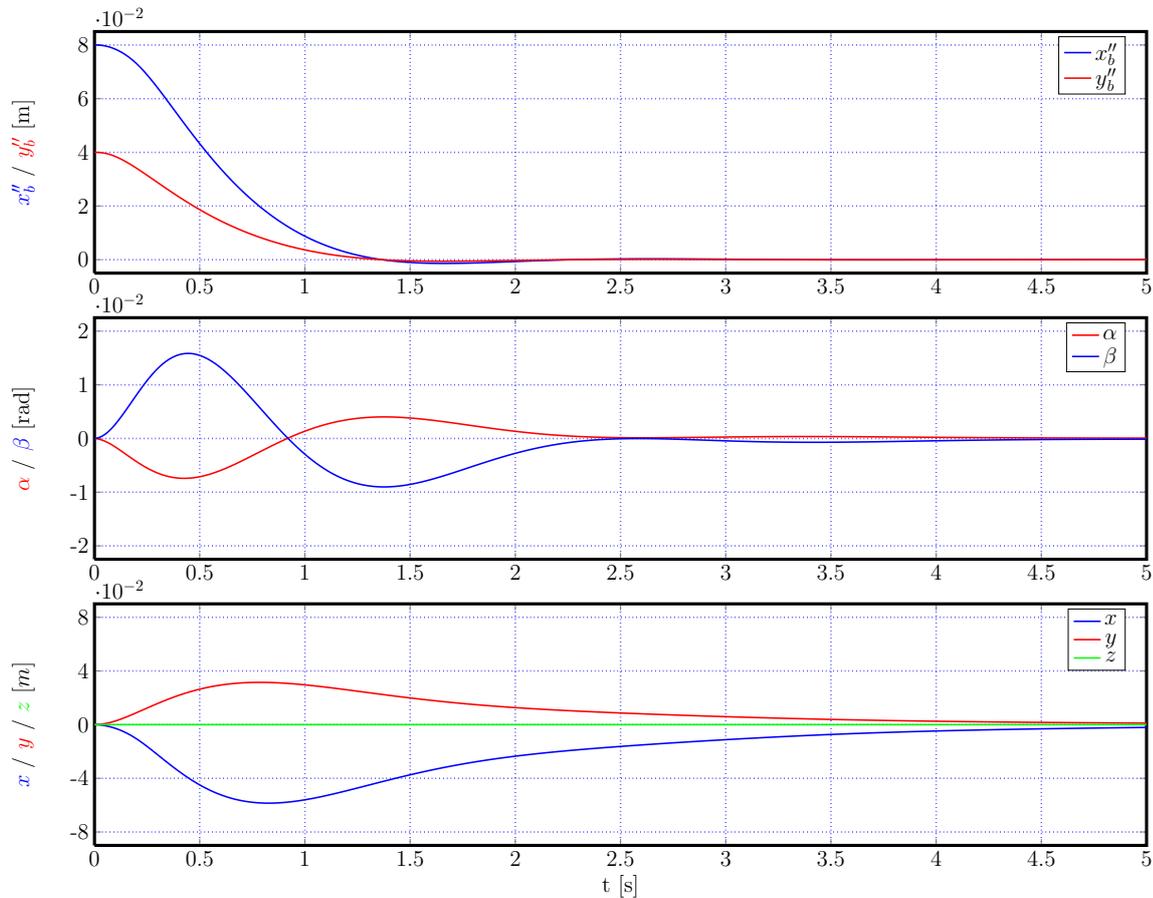


Abbildung 7.5.: Simulationsergebnisse einer Kugel auf einem Tablett in Simulink, Teil 1: Platzierungsvorgang einer Kugel aus einer Anfangsposition in den Mittelpunkt des Tablettts. Im oberen Diagramm ist der Weg der Kugel auf dem Tablett x_b'' und y_b'' , im mittleren α und β , welche die Orientierung des Tablettts beschreiben und im unteren die Bewegung des Tablettts x , y und z im Welt-KS zu sehen.

von x_b'' und y_b'' , jeweils in drei Schritten variiert. Bei diesem Experiment wird das Tablett aus dem Anfangszustand $(x_b'' = 0, y_b'' = 0, x = 0, y = 0, z = 0)^T$ m in den Zielzustand $(x_b'' = 0, y_b'' = 0, x = 0.6, y = 0.4, z = 0.2)^T$ m verschoben. Das Ziel ist das Tablett im Raum zu transportieren, ohne dass sich die Kugel aus dem Mittelpunkt des Tablettts entfernt.

Die Auswertung der Daten zeigt eine sehr direkte Wirkung der Gewichtungsfaktoren auf die Zustände x_b'' und y_b'' . Bei $q_{11} = q_{33} = 40$ (gestrichelte Darstellung) liegt der maximale Ausschlag der Kugel ziemlich genau bei 4 cm. Eine deutliche Verbesserung um einen Faktor von über zwei wird durch eine Verzehnfachung der Gewichtungsfaktoren auf $q_{11} = q_{33} = 400$ (durchgezogene Linie) erreicht. Hier liegt der maximale Ausschlag bei ca. 1.5 cm. Mit $q_{11} = q_{33} = 4000$ (gepunktete Linie) lässt sich die maxi-

7. Transport einer Kugel auf einem Tablett

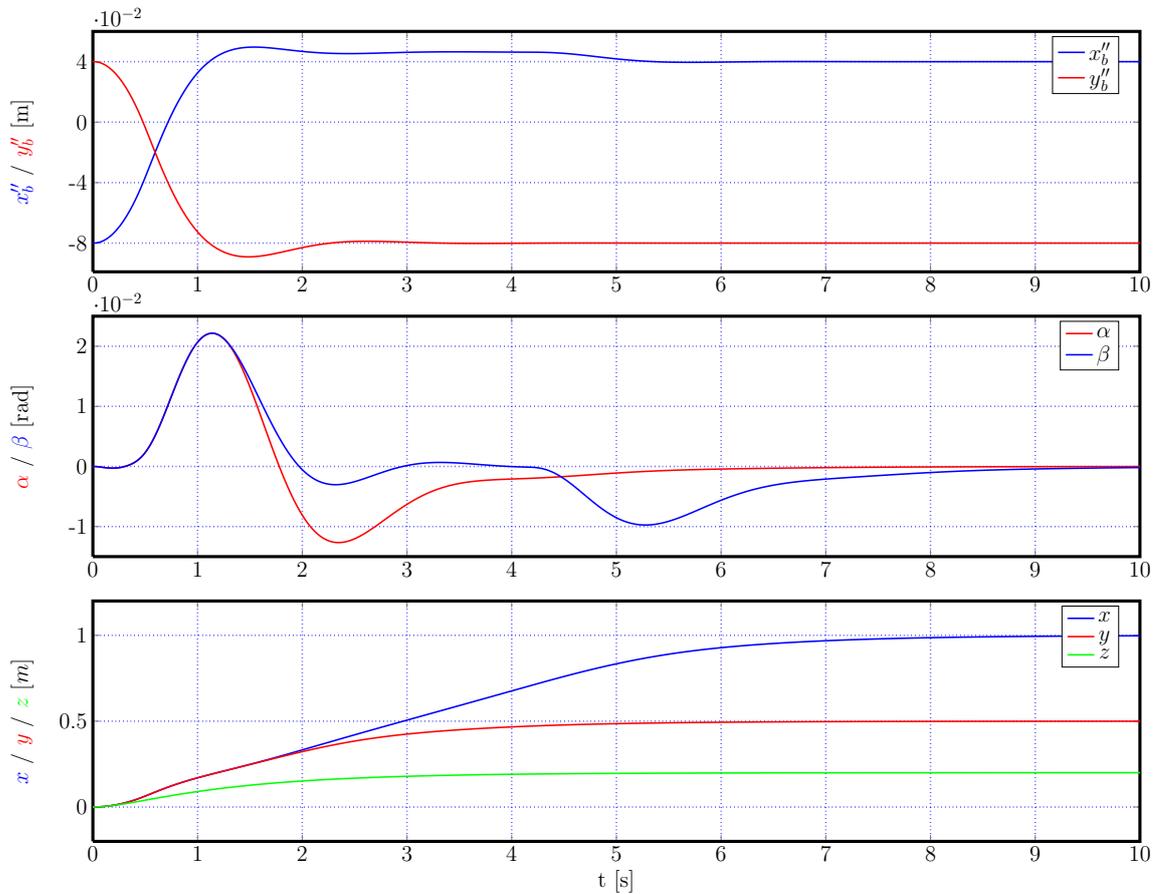


Abbildung 7.6.: Simulationsergebnisse einer Kugel auf einem Tablett in Simulink, Teil 2: Überlagerung aus Transport- und Platzierungsvorgang.

male Abweichung vom Tablettmittelpunkt auf ein Zehntel der ursprünglichen drücken. Der maximale Ausschlag liegt hier unter 4 mm. Die unteren beiden Diagramme zeigen keine großen Unterschiede bei Variation von q_{11} und q_{33} . Diese Zustände werden nur indirekt über die Zustände x_b'' und y_b'' beeinflusst.

Ein Vergleich der Gewichtungsfaktoren untereinander macht deutlich, dass die Werte von $q_{11} = q_{33} = 4000$ aber auch schon $q_{11} = q_{33} = 400$ deutlich höher ausfallen als die von anderen Elementen des Zustandsvektors. Dies hat zur Folge, dass der Regler auf diese Zustände extrem sensibilisiert wird und vor allem diese Größen für die Berechnung des Steuersignals ausschlaggebend sind. Die einseitige Sensibilisierung ist schlecht für die Stabilität der Transportperformance. Sie kann dazu führen, dass bei kleinen Abweichungen in stark gewichteten Zuständen eine große für andere Zustände evtl. negative Wirkung entsteht. Eine ungünstige Lage in den schwach gewichteten Zuständen kommt dagegen nur geringfügig zur Geltung. Deshalb würde man bei dieser Art von Experiment zwar die gewünschten Zustände (x_b'' und y_b'') deutlich stärker

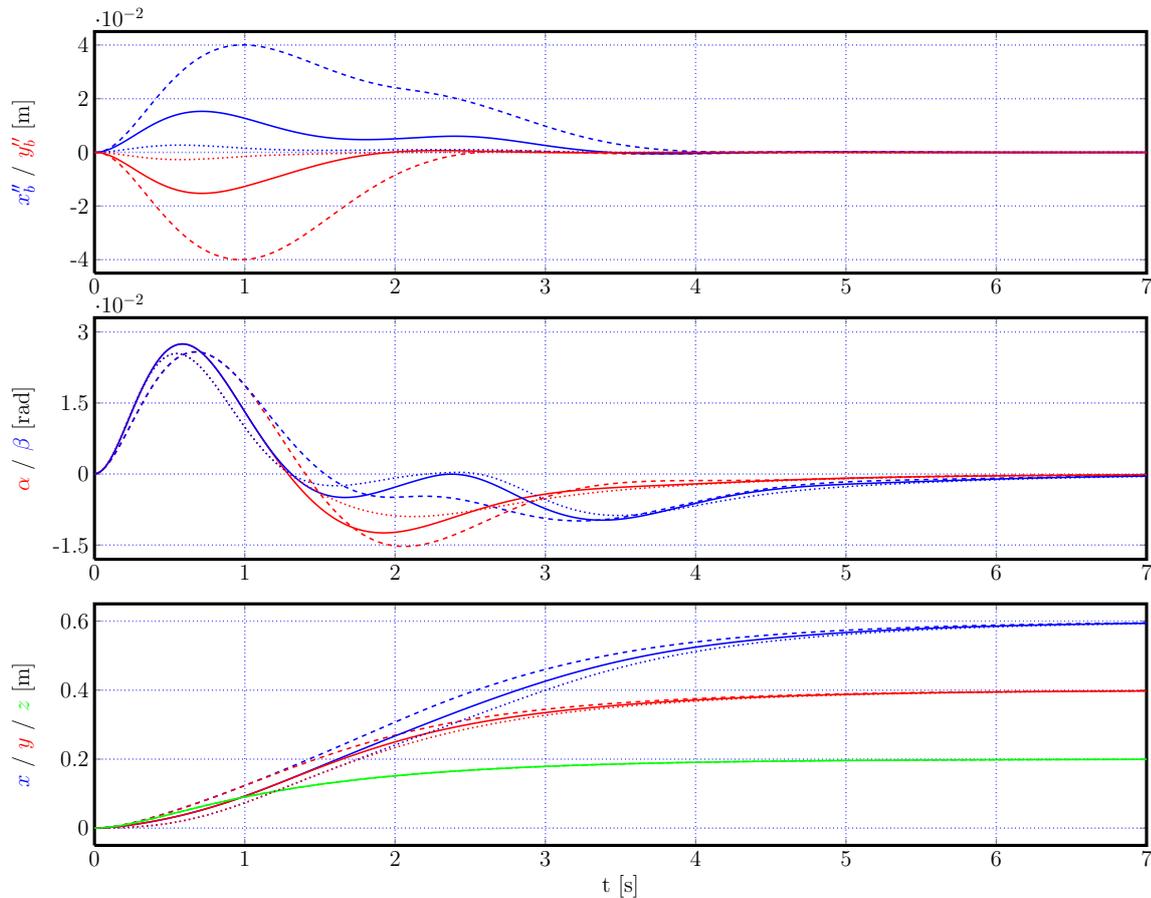


Abbildung 7.7.: Simulationsergebnisse einer Kugel auf einem Tablett in Simulink, Teil 3: Auswirkung der Gewichtungsfaktoren $q_{11} = q_{33} = 40/400/4000$ (gestrichelt/durchgezogen/gepunktet) der Matrix \mathbf{Q} auf die Zustände des Zustandsvektors.

gewichten, z.B. mit $q_{11} = q_{33} = 400$ aber nicht zu stark wie mit $q_{11} = q_{33} = 4000$.

7.5.2. Physikalische Nachbildung und Simulation einer Kugel auf einem Tablett

Die physikalische Simulation einer Kugel auf einem Tablett mit Hilfe der Physik-Engine Bullet dient dazu Regler, insbesondere den hier vorgestellten, an einem physikalisch richtig reagierenden System zu testen. Zu diesem Zweck wurde das in Abbildung 7.3 (b) abgebildete System als Bullet-Modell nachgebildet. Einen Ausschnitt aus der graphischen Darstellung der Simulation zeigt Abbildung 7.8. Eine Kugel rollt auf einem über dem Boden schwebenden Tablett.

Auch in diesem Versuch kommt für die Regelung des physikalischen Modells ein Simulink-Regler zum Einsatz, der bis auf die Dimensionen der Matrizen \mathbf{K} , \mathbf{V} und

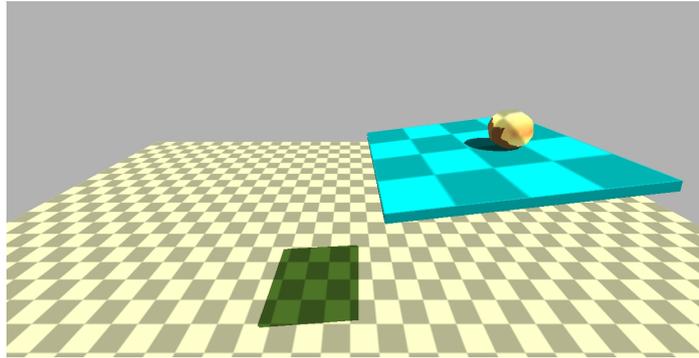


Abbildung 7.8.: Ausschnitt aus der graphischen Darstellung einer Bullet-Simulation. Eine Kugel rollt frei auf einem über dem Boden schwebenden Tablett.

des Zustandsvektors \boldsymbol{x} dem in Abbildung 4.11 (b) entspricht. Der Datenaustausch zwischen dem physikalischen Modell und dem Regler in Simulink erfolgt über einen gemeinsamen Speicherbereich (vgl. Abbildung 4.11 (c)).

Die experimentellen Ergebnisse aus der hier präsentierten Simulation werden im nächsten Abschnitt im Vergleich mit den Ergebnissen aus dem realen Experiment präsentiert.

7.6. Experimentelle Ergebnisse

In Abbildung 7.9 sind die Ergebnisse eines realen Versuchs und einer Bullet-Simulation zusammen dargestellt. Der Versuch zeigt eine Überlagerung aus einem räumlichen Transport des Tablett und einer gleichzeitigen Platzierung der Kugel auf dem Tablett. Kugel und Tablett werden aus dem Zustand $(x_b'' = -0.1, y_b'' = -0.1, x = 0, y = 0, z = 0)^T$ m in den Zustand $(x_b'' = 0.1, y_b'' = 0.1, x = 0.5, y = 0.5, z = 0.2)^T$ m bewegt. Die Darstellung besteht aus drei Teildiagrammen. Im oberen sind die Bewegungen der Kugel auf dem Tablett, im mittleren die Orientierung und im unteren die räumliche Bewegung des Tablett dargestellt.

Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Im oberen Diagramm offenbart sich ein leicht unterschiedliches Abrollverhalten der Kugeln. Die reale Kugel scheint etwas träger zu sein, da sie sich am Anfang etwas langsamer bewegt. Das liegt daran, dass der Reibungskoeffizient in der Bullet-Simulation zu klein gewählt wurde und die Kugel in der Simulation auf der Tablettoberfläche zum Teil gleitet und nicht abrollt. Daraus resultiert eine leicht andere Reaktion in der Tablettorientierung. Die kleinen Abweichungen im Verlauf der Kugelbewegung spiegeln sich auch in der räumlichen Bewegung des Tablett wieder. Hier fallen sie aufgrund einer größeren Achsenskalierung weniger auf. Alle Bewegungen der Kugel und des Tablett sind sehr direkt und erreichen ihre Zielpositionen ohne überzuschwingen. Das spricht dafür, dass die Reglerparameter, die bereits in der Bullet-Simulation angepasst wurden, optimal

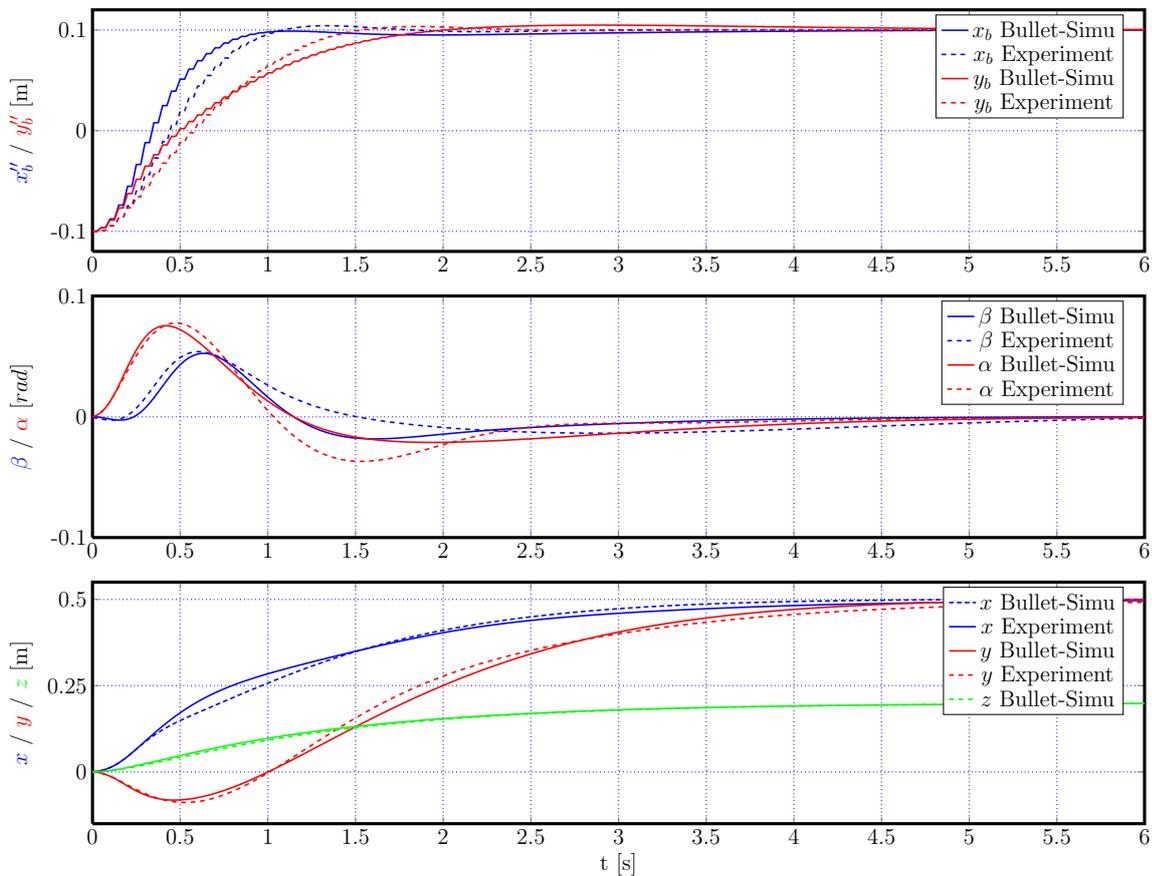


Abbildung 7.9.: Vergleich der Ergebnisse für den Transport einer Kugel auf einem Tablett in der Bullet-Simulation und dem Experiment. Gezeigt wird eine Überlagerung aus einem räumlichen Transport des Tablett und einer gleichzeitigen Platzierung der Kugel auf dem Tablett. Das Tablett wird aus dem Zustand $(x_b'' = -0.1, y_b'' = -0.1, x = 0, y = 0, z = 0)^T$ m in den Zustand $(x_b'' = 0.1, y_b'' = 0.1, x = 0.5, y = 0.5, z = 0.2)^T$ m überführt.

gewählt wurden.

Für die Abweichungen der Wertereihen voneinander ist ein Zusammenspiel folgender Gründe verantwortlich:

- Der Rollvorgang einer Kugel auf einer Unterlage ist ein Oberflächen- und Reibungsproblem. Diese beiden Phänomene sind physikalisch besonders schwer zu erfassen. Eine Kunststoffkugel rollt auf einer Kunststoffunterlage anders als eine Stahlkugel auf einer Stahlplatte. Die Kombinationen aus verschiedenen Materialien sind sehr zahlreich. Wenn eine Kugel ohne Schlupf abrollt wirkt sie träger, weil sich die potentielle Energie, aus der die Bewegung resultiert, auf lineare Bewegungs- und Rotationsenergie aufteilt.
- Roll- und Kontaktvorgänge sind in physikalischen Simulationen ebenfalls schwie-

rig darzustellen. Um solche Phänomene zu behandeln, müssen sich die Modellobjekte gegenseitig durchdringen. Wie weit sie ineinander eindringen hängt von vielen Faktoren ab: dem Berechnungszeitintervall, der Geschwindigkeit der Objekte, zusätzlichen Kräften quer und tangential zur Kontaktfläche, der Elastizität der Objekte, um hier nur einige zu nennen. Aus der Durchdringung resultieren Verdrängungskräfte, die das Kontaktverhalten unvorhersehbar beeinflussen.

- Wenn zwei Experimente nicht genau gleich ablaufen, dann ist auch die Reaktion der Regler nur ähnlich und nie genau gleich.

Die Berechnung aller Reglerparameter wurde im Experiment und in der Simulation gleich gewählt. Das MATLAB-Skript zur Berechnung aller Parameter findet man im Anhang A.9.

8. Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern

Der Transport von Objekten unter Minimierung von Querkräften und insbesondere der Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern sind wichtige Themen in vielen Produktionsprozessen. Auf der Grundlage der Kapitel 4 und 7 werden hier am Beispiel des Transports von Flüssigkeiten in offenen Behältern zwei Methoden für den Transport von Objekten unter Minimierung von Querkräften vorgestellt. Da sich reale Experimente in Diagrammen schwieriger darstellen lassen als Simulationsergebnisse, werden hier ausschließlich die Auswertungen der Bullet-Simulationen präsentiert. In realen Experimenten werden Simulationsergebnisse bestätigt.

8.1. Pendeltablett

Wie bereits erwähnt, resultiert die Schwierigkeit ein Pendel kontrolliert zu bewegen aus der Tatsache, dass die Bewegung des Pendelkörpers nur indirekt beeinflusst werden kann. Das liegt daran, dass eine Kraft auf die Last nur entlang des Fadens ausgeübt werden kann. Es bedarf einer weiteren Kraft wenn das Pendel nicht zufällig entlang des Fadens, sondern seitlich bewegt werden soll. Diese Aufgabe übernimmt die Gewichtskraft. Kapitel 4 stellt eine Transportmethode vor, mit der ein Pendel kontrolliert transportiert werden kann. Diese Methode wird hier eingesetzt, um Objekte unter Vermeidung der Querkräfte zu transportieren.

8.1.1. Experimenteller Aufbau und physikalisches Modell

Abbildung 8.1 (a) zeigt ein als Pendel aufgehängtes Tablett. Das Tablett ist durch eine Dreipunktaufhängung an einem Faden am TCP des Roboters befestigt. Es besteht aus einer runden PVC-Platte, auf der Objekte platziert werden können. In der Abbildung steht ein Becher mit Wasser drauf. Direkt über dem Punkt, in dem die drei Fäden der Aufhängung zusammenlaufen, ist eine Marker-Kugel angebracht. Diese dient als Reflektor für die IR-LED, um das Tracking der Kugel zu vereinfachen. Oberhalb der Marker-Kugel ist ein S-Haken angebracht, der ein schnelles Wechseln der Last erlaubt.

Die Idee hinter diesem Transportmechanismus ist, dass beim Pendeltransport keine Querkräfte auftreten. Durch die Dreipunktaufhängung bildet der Faden ein Lot auf dem Tablett. Das heißt, dass alle Kräfte, die durch den Faden auf das Tablett ausgeübt



(a) Pendeltablett



(b) Tablettkonstruktion

Abbildung 8.1.: Experimenteller Aufbau für den Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern.

- (a) Ein Tablett, das mittels einer Dreipunktaufhängung als Pendel aufgehängt ist.
- (b) Eine Tablettkonstruktion: unterhalb des Haupttabletts ist ein kleines in der Höhe verstellbares Tablett angebracht, auf dem ein Becher mit Wasser freistehend Platz findet.

werden, senkrecht dazu wirken. Objekte auf dem Tablett wirken dadurch je nach Größe der Kraft schwerer oder leichter. Es entsteht aber keine Kraft, die quer zur Tabletoberfläche wirkt. In Verbindung mit dem kontrollierten Transport eines Pendels aus Kapitel 4 ist mit dieser Idee ein kontrollierter von Querkräften freier Transport von Objekten auf einem Pendeltablett möglich.

Das physikalische Modell des Systems wird aus Kapitel 4 vollständig übernommen. Damit ergeben sich Bewegungsgleichungen (4.6) und (4.7) und daraus der aus Abschnitt 4.3 bekannte Zustandsregler.

8.1.2. Physikalische Nachbildung mit Bullet

Dieser Abschnitt ist der Modellierung des oben vorgestellten Pendeltabletts mit Hilfe der Physik-Engine Bullet gewidmet. Abbildungen 8.2 (a) und (b) zeigen Ausschnitte aus der graphischen Darstellung des Modells. Der Wassercontainer ist als ein rechteckiger Korb modelliert, der durch eine unsichtbare Stange und ein Kugelgelenk mit dem Aufhängepunkt (blaue Kugel) verbunden ist. Die Modellierung einer Flüssigkeit in einer physikalischen Simulation ist äußerst schwierig. Oft wird entweder die Fluidoberfläche als eine 2D-Funktion simuliert oder wie hier als eine Ansammlung von kleinen

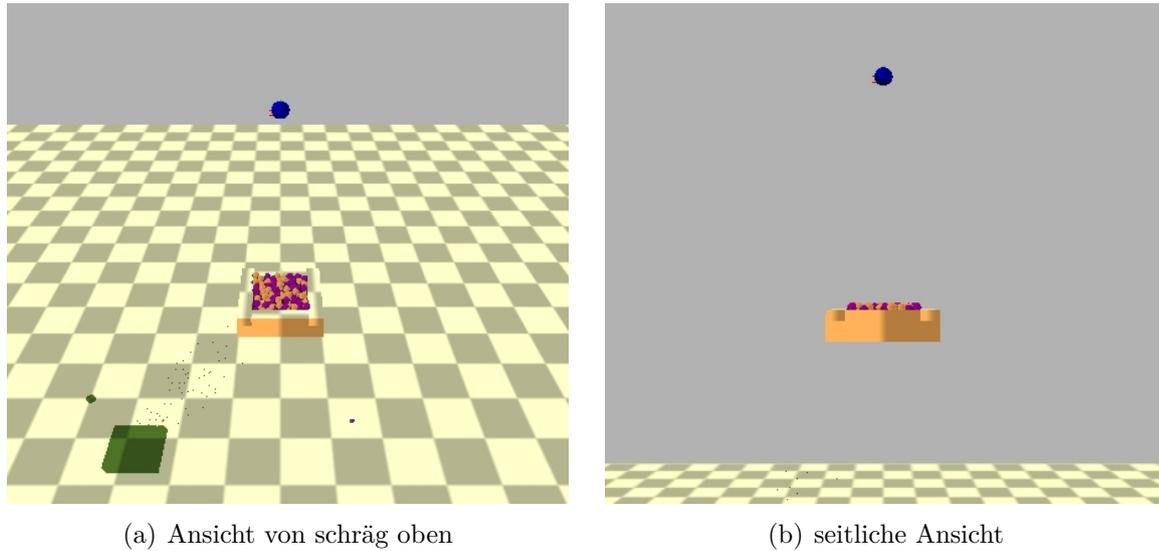


Abbildung 8.2.: Ausschnitte aus der graphischen Darstellung der Bullet-Simulation eines Wassercontainers.

(a) Ein rechteckiger Container hängt an einer unsichtbaren Stange, verbunden durch ein Kugelgelenk an einem Gelenkpunkt (blaue Kugel). Der Container ist mit 125 kleinen Kugeln gefüllt.

(b) zeigt einen über den Rand vollen Container in der Seitenansicht. Die obersten Kugeln liegen mit ihren Schwerpunkten über dem Containerrand.

Kugeln. In diesem Experiment werden 125 Kugeln von 1 cm Radius beim Start der Simulation, räumlich als Gitter angeordnet, erzeugt und in den Container fallen gelassen. Damit soll ein möglichst ungeordneter Haufen erzeugt werden. Teilabbildung 8.2 (b) zeigt das Pendel in der Seitenansicht. Die oberen Kugeln liegen mit ihren Schwerpunkten knapp über dem Containerrand. Der Container ist über den Rand voll.

8.1.3. Experimente und Ergebnisse

Es sind viele reale Experimente mit dem in Abbildung 8.1 (a) gezeigten Aufbau gefahren worden und die Ergebnisse aus den Simulationen konnten bestätigt werden. Die Experimente sind in zahlreichen Videos festgehalten worden und wurden jedoch nicht mathematisch ausgewertet. Der Grund dafür ist, dass die Schwingung einer Flüssigkeit sich schwer in einem Diagramm darstellen lässt. In der Simulation hat man dagegen die vollständige Information über das System zu jedem Zeitpunkt.

Das Experiment mit dem Pendelcontainer ist in Abbildung 8.3 dargestellt. Im oberen Diagramm sind die z'' -Komponenten aller Kugelpositionen im containerfesten KS innerhalb und außerhalb des Containers dargestellt. Der Containerboden und der obere Rand sind gestrichelt ins Diagramm eingezeichnet. Die Kugeln werden in einem räum-

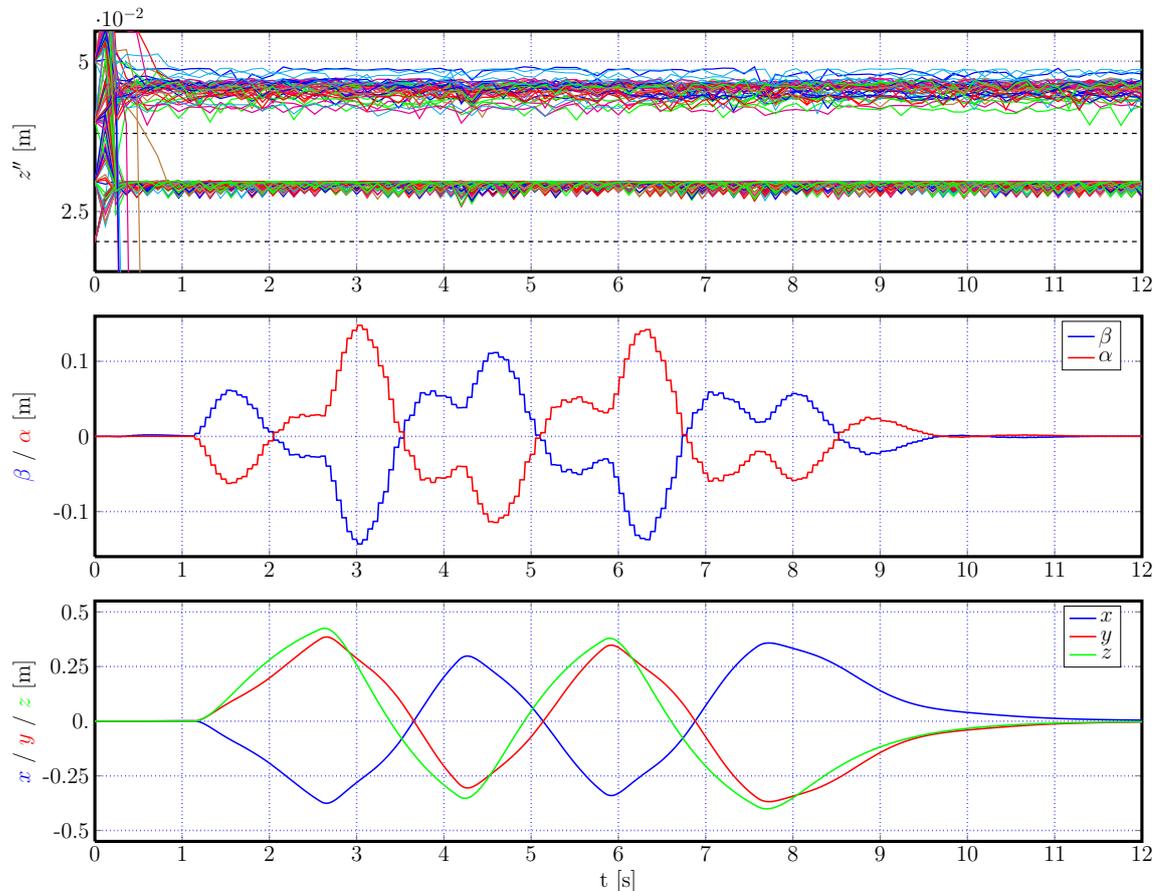


Abbildung 8.3.: Ein Transportexperiment mit einem Pendelcontainer in Bullet. Im oberen Diagramm sind die z'' -Komponenten aller Kugelpositionen im containerfesten KS dargestellt. Die Bodenoberfläche und der Containerrand sind gestrichelt eingezeichnet. Die Kugeln bilden zwei Schichten, wobei die Kugeln aus der oberen Schicht über dem Containerrand liegen. Im mittleren Diagramm ist die Schwingung des Pendelcontainers dargestellt und im unteren die dazugehörige Bewegung des Aufhängepunkts. Der Transport ist hier erfolgreich. Keine der Kugeln geht verloren.

lichen Gitter erzeugt (nur teilweise dargestellt) und anschließend in den Container fallen gelassen. Man erkennt, dass beim Befüllvorgang einige Kugeln gleich verloren gehen. Das passiert jedoch bevor die Bewegung einsetzt.

Es ist klar zu erkennen, dass die Kugeln zwei Schichten ausbilden. Die untere Schicht ist deutlich kompakter und nach oben hin durch die obere Schicht sehr scharf begrenzt. Nach unten können die Kugeln aus der unteren Schicht in den Boden des Containers teilweise eindringen und werden von der Bodenplatte wieder verdrängt. Die obere Schicht ist deutlich loser. Die Kugeln wechselwirken durch ständige Stöße miteinander und die ganze Schicht wird aufgelockert. Dadurch können die obersten Kugeln den

Verbund einfacher verlassen.

Im mittleren und im unteren Diagramm sind mit α und β die Auslenkung des Pendels bzw. mit x , y und z die Bewegung des Aufhängepunkts dargestellt. Vor allem aus dem unteren Diagramm ist zu erkennen, dass bei diesem Versuch ein 'Zick-Zack'-Kurs gefahren wird. Die Bewegung erfolgt in allen drei Dimensionen. Sie startet und endet im Ursprung des Welt-KS. Durch die abrupten Umkehrbewegungen des Aufhängepunkts werden hohe Beschleunigungen und eine Schwingung des Pendelcontainers erzeugt. Der größte Pendelausschlag liegt knapp unterhalb von 15 cm.

Das obere Diagramm zeigt keine Auswirkungen der Gelenkpunktbewegung und der Schwingung auf den Kugelverband im Container. Es treten keine oder nur sehr kleine Kräfte quer zum Containerboden auf. Damit ist diese Methode erfolgreich getestet und kann für den Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern eingesetzt werden.

8.2. Eine Kugel auf einem Tablett als Transportsystem für Flüssigkeiten in offenen Behältern

Eine Kugel auf einem Tablett ist ein Indikator für auftretende Querkräfte. Wenn die Kugel einer Querkraft ausgesetzt wird, beginnt sie zu rollen. Kräfte die senkrecht zur Tablettebene wirken, lassen die Kugel schwerer bzw. leichter erscheinen, bewirken aber kein Rollen zur Seite. In diesem Abschnitt wird das Modell einer Kugel auf einem Tablett für den Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern eingesetzt.

8.2.1. Experimenteller Aufbau und physikalisches Modell

Der experimentelle Aufbau ist in Abbildung 8.1 (b) dargestellt. Die Tablettkonstruktion ist aus den Experimenten in Kapitel 7 bekannt (vgl. Abbildung 7.3). Das kleine Tablett wird hier dazu benutzt einen Becher mit Wasser freistehend zu transportieren.

Für den Erfolg des Experiments ist die Wahl des Drehpunkts entscheidend, denn nur dieser ist wirklich frei von Querkräften. In den Experimenten aus Kapitel 7 liegt der Drehpunkt in der Tablettebene. Beim Transport eines Bechers auf dem unteren Tablett ist es anschaulich klar, dass bei einer Drehung um den Mittelpunkt des großen Tablets auf der Tablettfläche des unteren sehr wohl Kräfte wirken. Wird der Drehpunkt in den Mittelpunkt des kleinen Tablets gelegt dann stimmt das physikalische Modell in Abbildung 7.1 nicht mehr. Die Bewegung der Kugel ist damit nicht mehr richtig beschrieben. Um diese Fragen zu beleuchten, werden im nächsten Abschnitt drei Versuche diskutiert. Allen Versuchen liegt hier das in Abbildung 7.1 dargestellte Modell zu Grunde. Es wird nur der Drehpunkt verschoben und Informationen über das physikalische System unterschiedlich verwendet.

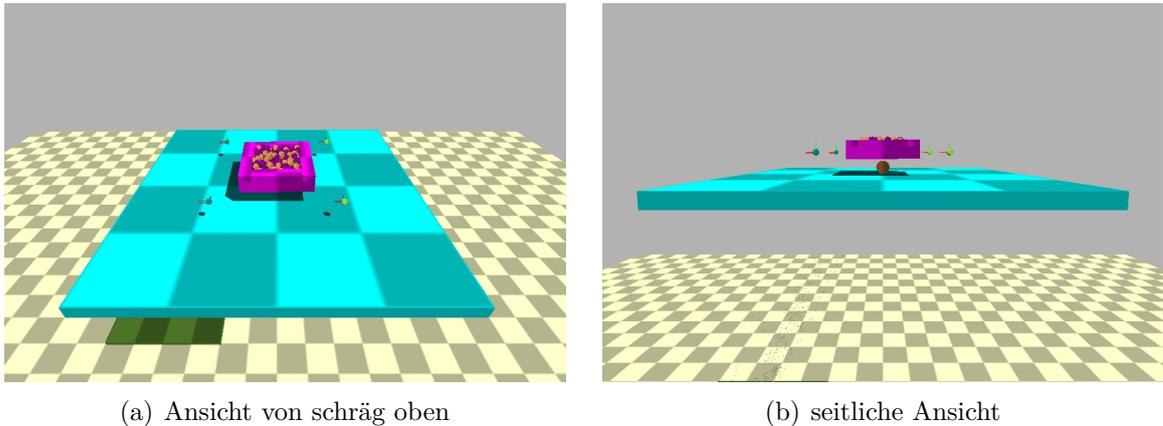


Abbildung 8.4.: Ausschnitte aus der graphischen Darstellung einer Bullet-Simulation eines Transportsystems für Flüssigkeiten in offenen Behältern mit Hilfe des Modells einer Kugel auf einem Tablett.

(a) Der aus dem vorhergehenden Abschnitt bekannte rechteckige Container wird hier mit Hilfe von vier festen Gelenken (kleine Kugeln in Verlängerung der Containerrechen) über der Tablettfläche befestigt. Der Container wird wieder mit 125 Kugeln gefüllt.

(b) In dieser Ansicht ist die kleine Sensorkugel unterhalb des Containers zu sehen. Die Kugel ist klein gewählt damit die in Frage kommenden Drehpunkte (Tablettmittelpunkt oder Mittelpunkt des Containerbodens) möglichst nah beieinander platziert werden können.

8.2.2. Physikalische Nachbildung mit Bullet

Abbildungen 8.4 (a) und (b) zeigen Ausschnitte aus der graphischen Darstellung einer Bullet-Simulation. Hier ist der experimentelle Aufbau aus Abbildung 8.1 (b) nachgestellt. Der Container befindet sich oberhalb der Kugel, weil so die in Frage kommenden Drehpunkte, der Containerboden und die Tablettfläche, näher zusammen platziert werden können. Da die Position der Sensor-Kugel direkt aus Bullet ausgelesen wird und kein optisches Tracking in der Simulation notwendig ist, verdeckt der Container auch nicht die Sicht auf die Tablettoberfläche. Der rechteckige Behälter ist, wie schon bei Experimenten davor, mit 125 kleinen Kugeln gefüllt. Die Sensorkugel ist in Teilabbildung 8.4 (b) unter dem Container zu sehen. Die Größe (und die Masse) der Kugel spielen bei der Berechnung des Zustandsreglers keine Rolle (vgl. MATLAB-Skripten im Anhang A.4 und A.9). Der Container ist mit Hilfe von vier Kugelgelenken (kleine Kugeln in Verlängerung der Containerrechen) über der Tablettfläche befestigt.

8.2.3. Experimente und Ergebnisse

Da sich Schwingungen von Flüssigkeiten in Diagrammen nur schwer darstellen lassen, werden hier Simulationsergebnisse auf der Basis der physikalischen Simulationen in Bullet präsentiert. Es sind viele reale Experimente mit der in Abbildung 8.1 (b)

gezeigten Tablettkonstruktion gefahren worden. Alle Ergebnisse bestätigen die präsentierten Aussagen.

Es werden insgesamt drei Versuche präsentiert. Beim ersten ist das komplette System aktiv. Die Kugel wird als Sensor benutzt. Große Beschleunigungen werden durch abrupte Richtungsumkehrungen des Tablett erreicht. Der Drehpunkt liegt im Tablettmittelpunkt. Beim zweiten Versuch wird auf das Tracking der Kugel verzichtet und der Drehpunkt in den Mittelpunkt des Containerbodens verlegt. Die Reaktion des Systems wird unter ähnlichen Bedingungen getestet. Im dritten Versuch wird gezeigt was passiert, wenn das Tracking der Kugel und die Anpassung der Orientierung außer Kraft gesetzt werden.

Die Auswertung des ersten Versuchs ist in Abbildung 8.5 gezeigt. Zu den z'' -Komponenten der 125 Kugeln auf der Höhe des Containers im oberen Diagramm kommt noch der Bereich auf der Höhe der Tablettoberfläche im zweiten Diagramm von oben hinzu. Hier ist die Bewegung der Sensor-Kugel und der Kugeln, die aus dem Container auf die Tablettoberfläche herunterfallen im Tablett-KS in z'' -Richtung zu sehen. Die rote Kurve im zweiten Diagramm zeigt die z''_b -Komponente der 5 cm großen Sensor-Kugel (Durchmesser). Da die Sensor-Kugel 2.5-mal größer ist, verläuft ihre Darstellung (rot) im Allgemeinen höher.

Im mittleren Diagramm ist mit x''_b und y''_b die Bewegung der Sensor-Kugel auf dem Tablett dargestellt. Die beiden Kurven liegen aufgrund einer Bewegung des Tablett entlang der Raumdiagonalen fast genau übereinander. Durch die großen Beschleunigungen durch plötzliches Umkehren der Tablettbewegung sind die Ausschläge der Kugel ebenfalls recht groß.

Das vorletzte Diagramm zeigt mit α und β die Orientierung des Tablett. Auch dieser Verlauf ist fast genau achsensymmetrisch. Die größten Winkelausschläge liegen knapp unter 0.2 rad ($\hat{=} 10^\circ$). Aufgrund der ständigen Hin- und Her-Bewegung ist auch die Winkel Anpassung über die Dauer des gesamten Experiments aktiv.

Und schließlich ist im letzten Diagramm die Tablettbewegung zu sehen. Die Bewegungen in x und y -Richtungen unterscheiden sich nur im Vorzeichen und die Bewegung in z -Richtung folgt dem Vorzeichen von x .

Im gesamten Verlauf des Experiments werden zwei Kugeln verloren. Die erste fällt bei $t \approx 0.5 \text{ s}$ und bleibt auf dem Tablett liegen. Und die zweite löst sich bei $t \approx 2.2 \text{ s}$ und fällt durch das Tablett hindurch. Interessant sind auch Übergänge der Kugeln aus der unteren Schicht in die obere. Auch in allen nachfolgenden Experimenten wechseln einige Kugeln ihre Position auf diese Weise und immer von unten nach oben. Eine davon (rote Linie) scheint auch den Fall der zweiten Kugel auszulösen. Bei allen Übergängen sind leichte Anhebungen der Kugeln in der oberen Schicht zu erkennen, die ein Herauslösen einer Kugel aus dem Verband erleichtern.

Im nächsten Versuch wird auf das Tracking der Kugel verzichtet und der Drehpunkt in den Mittelpunkt des Containerbodens gelegt. Ein Teil der Informationen über den Zustand des Systems wird aufgegeben. Durch den Verzicht auf die Informationen wird aber ein optimaler Drehpunkt für den Transport des Containers gewonnen. Die Rege-

8. Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern

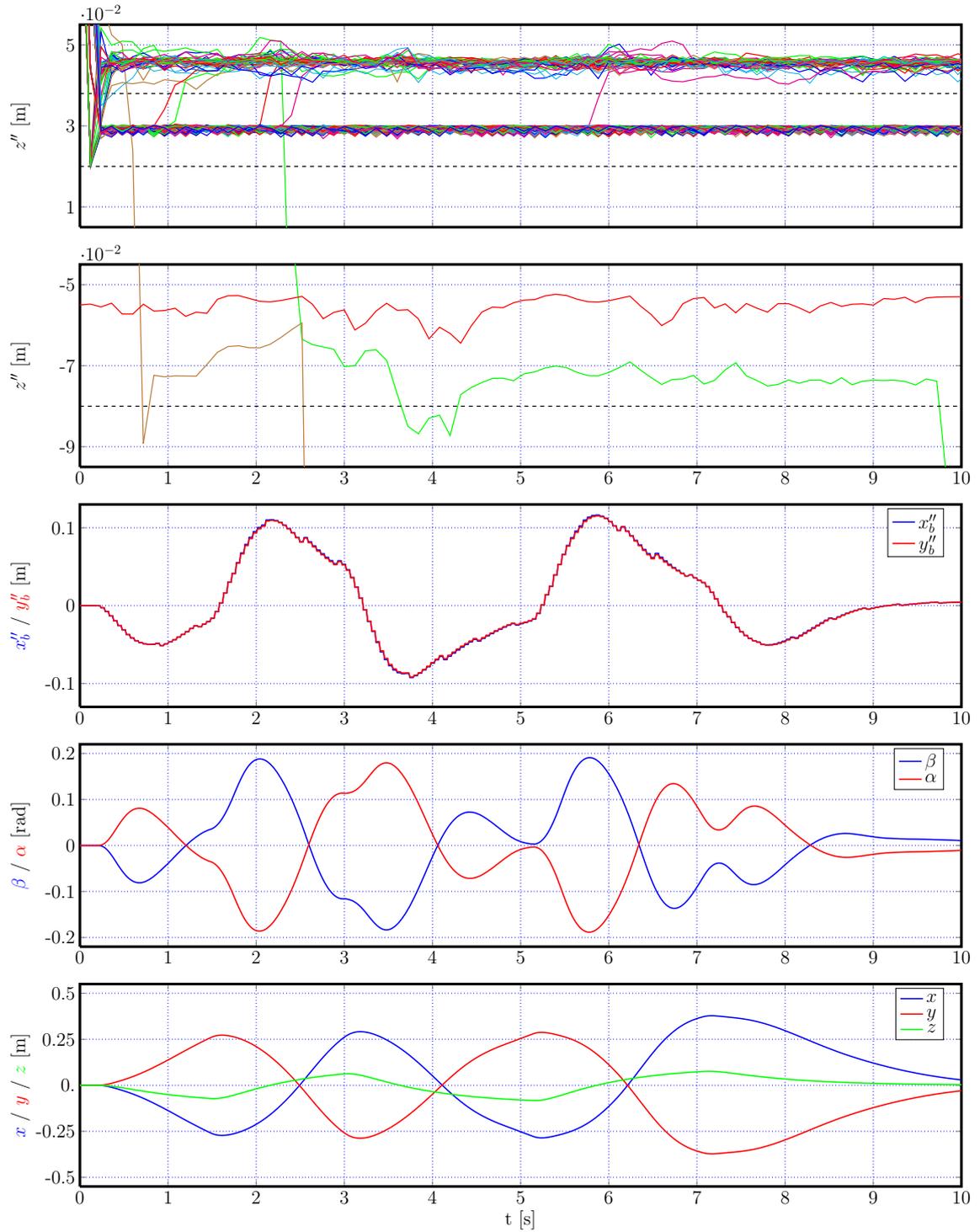


Abbildung 8.5.: Simulation eines Transportvorgangs mit einem Tabletcontainer auf der Basis des Modells einer Kugel auf einem Tablett in Bullet, Teil 1/3

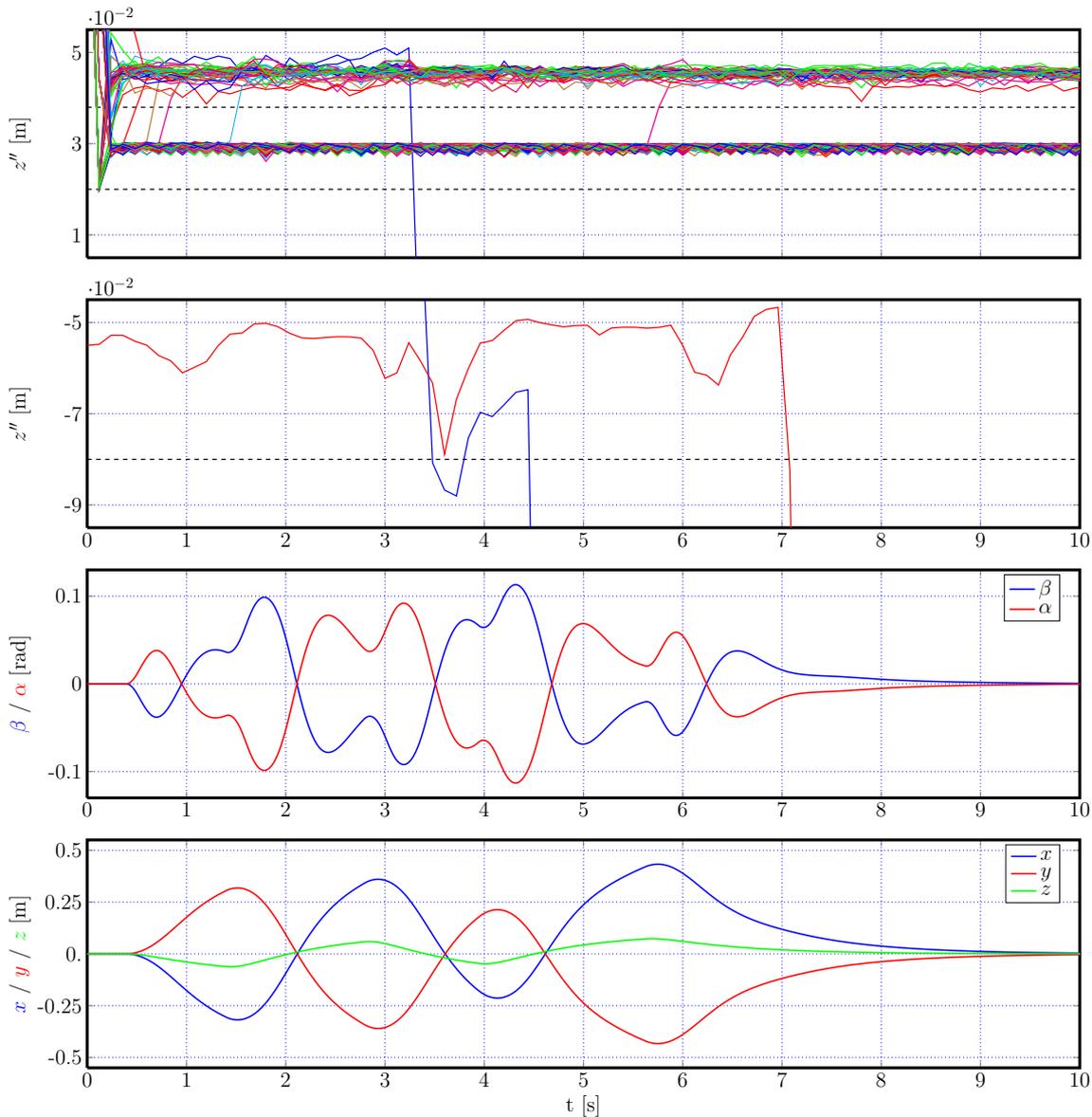


Abbildung 8.6.: Simulation eines Transportvorgangs mit einem Tablettcontainer auf der Basis des Modells einer Kugel auf einem Tablett in Bullet, Teil 2/3. Im Gegensatz zum Experiment davor wird hier auf das Tracking der Kugel verzichtet. Der Drehpunkt wird in den Containerboden gelegt.

lung des Systems erfolgt nur auf der Basis der Tablettposition. Die ersten vier Werte des Zustandsvektors werden unabhängig von der tatsächlichen Position der Sensor-Kugel auf null gesetzt.

Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in Abbildung 8.6 dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Bewegung des Tablett schneller und direkter wird: α und β erreichen hier

8. Transport von Flüssigkeiten in offenen Behältern

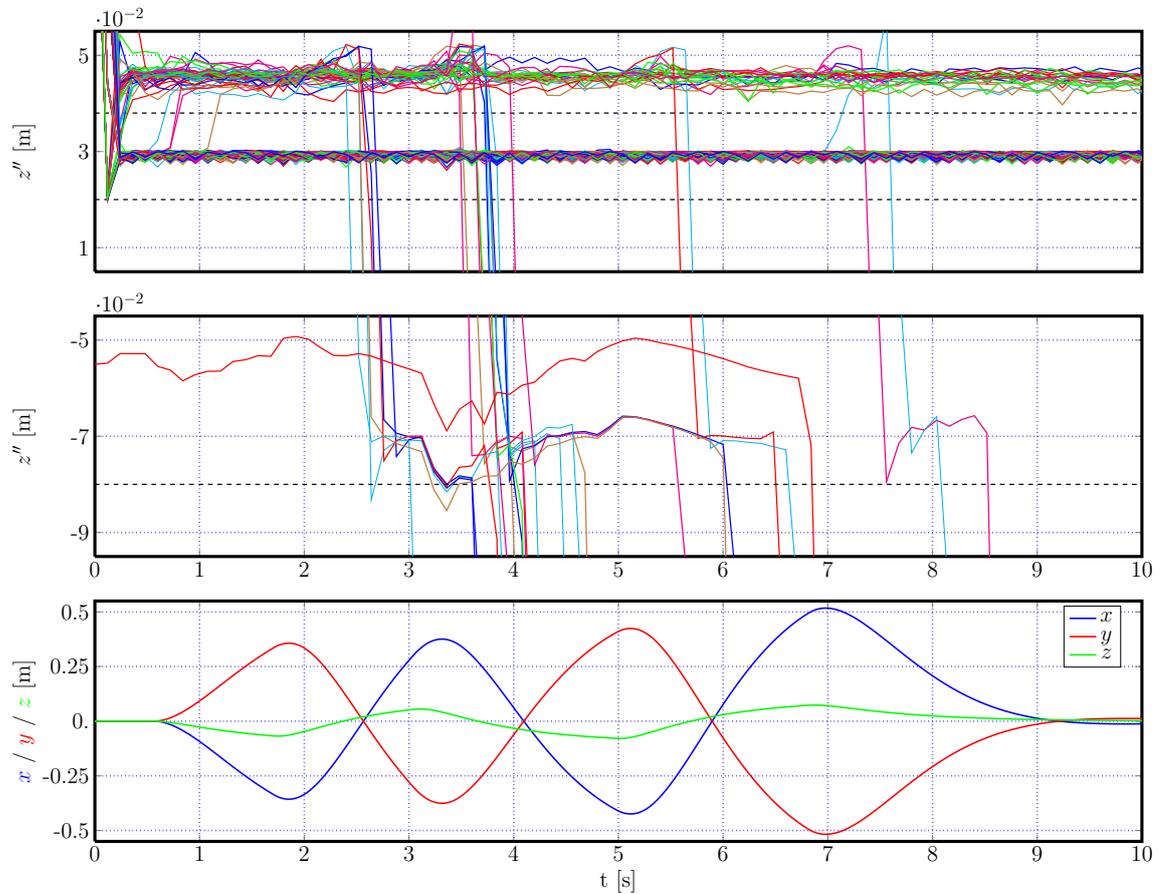


Abbildung 8.7.: Simulation eines Transportvorgangs mit einem Tabletcontainer auf der Basis des Modells einer Kugel auf einem Tablett in Bullet, Teil 3/3. Zusätzlich zum zweiten Experiment wird hier auch noch auf die Anpassung der Containerorientierung verzichtet.

Ausschläge, die fast um einen Faktor zwei kleiner sind.

Das Verhalten der 'Flüssigkeit' ist dadurch aber keinesfalls schlechter oder unruhi-ger. Eine Kugel geht aus dem Container bei $t \approx 3.2\text{s}$ verloren. Diese springt kurz auf dem Tablett auf und fällt dann weiter auf den Boden. Am Verlauf der Sensor-Kugel, die am Anfang in der Mitte des Tablets platziert wird, ist zu sehen, dass diese bei $t \approx 7\text{s}$ und damit recht spät vom Tablett herunter fällt. Dass der Transport für sie nicht ganz optimal ist, ist eine Folge der Wahl eines für die Sensor-Kugel nicht optimalen Drehpunkts. Weitere ungünstige Kräfte kommen mit dem wachsenden Abstand vom Mittelpunkt hinzu.

Der dritte Versuch, dessen Ergebnisse in Abbildung 8.7 dargestellt sind, demonst-riert wie wirksam die davor präsentierten Transportsysteme sind. Hier wird auf das Tracking der Kugel und die Anpassung der Orientierung verzichtet. Die entsprechen- den Werte werden auf null gesetzt. Das Tablett bewegt sich in diesem Versuch flach

auf einer ähnlichen Trajektorie wie in den Experimenten davor. Nach dem ersten und zweiten Umkehrpunkt verlassen gleich mehrere Kugeln den Container. Nach der dritten und der letzten Umkehrung kommen nur noch ein paar Kugeln herunter, weil die Kugeln in der oberen Schicht am Rand bereits heruntergefallen sind und keine Kugeln mehr direkt am Rand liegen.

8.3. Fazit

Aufgrund der guten Ergebnisse lässt sich sagen, dass sich die beiden Transportsysteme sehr gut für den Transport von Flüssigkeiten eignen. Der Transportvorgang als Pendel ist bereit für den Einsatz. Beim Tablettcontainer müssen die realen Einsatzbereiche genauer untersucht werden. Hier empfiehlt sich die Methode aus dem zweiten Versuch, also ohne das Tracking der Kugel. Damit ist das Problem mit dem Drehpunkt gelöst und dadurch die Transportwege direkter. Eventuell müssen aber kleinere Querkräfte in Kauf genommen werden, die vielleicht durch eine geschickte Wahl der Gefäßform ausgeglichen werden könnten.

9. Schwingungsausgleich beim Verfahren einer mobilen Plattform

Mobile Serviceroboter halten sowohl im modernen Herstellungsprozess als auch im privaten Haushalt immer mehr Einzug, da sie bedingt durch ihre mobile und flexible Bauweise vielseitig einsetzbar sind. Durch Beschleunigungsphasen beim Transport von Lasten oder durch einfaches Verfahren der Plattform können Schwingungen der Plattformbasis angeregt werden. Diese Schwingungen verändern die Fahreigenschaften der Plattform und behindern die Ausführung von Aufgaben am Zielort, da das Abschwingen der Schwingungen abgewartet werden muss. Die Schwingungen können durch bewegliche Aufbauten auf dem Roboter (z. B. Roboterarm, Stewart-Plattform u.s.w.) unterdrückt bzw. minimiert werden.

9.1. Aufbau des physikalischen Modells

In diesem Abschnitt wird ein allgemeines physikalisches Modell für einen mobilen Serviceroboter mit einem Roboterarm als Aufbau aufgestellt. Dabei soll das Modell möglichst allgemein gestaltet werden, um mit der physikalischen Beschreibung möglichst viele Bauformen von mobilen Plattformen abzudecken. Anschließend wird auf der Basis des physikalischen Modells die mathematische Ableitung des Reglers erfolgen, der das Aufschaukeln der Plattform in Echtzeit unterdrücken soll.

Abbildung 9.1 zeigt eine Skizze des physikalischen Modells. Den Mittelpunkt des Modells bildet ein raumfestes KS. In diesem KS sind in einem festen Abstand vom Mittelpunkt im negativen Bereich der Achsen Wände angebracht. Diese stehen senkrecht auf den Achsen und bilden in Richtung der Achsen feste Ankerpunkte der Federn. Das andere Ende der Federn ist im Mittelpunkt einer großen Masse M befestigt, welche die Basis der Plattform darstellt. Die große Masse ist in der Skizze durch eine große rote Kugel symbolisiert. Der Einfachheit halber sollen die Federn nur entlang ihrer Längsachse belastet werden können, d. h. dass sich die Federn immer parallel zu den Achsen des raumfesten KS ausrichten. Das Ende an der Wand ist immer auf der Höhe der Kugel. Dies ist durch gestrichelte Linien als Projektion auf die Wände in der Abbildung veranschaulicht. Im Modell ist die Länge der Federn so gewählt, dass sich die Masse M im Gleichgewicht im Mittelpunkt des raumfesten KS befindet. Die Härte der Federn wird durch die Federkonstanten $k_{x,y,z}$ und die Dämpfung entsprechend mit $d_{x,y,z}$ beschrieben. Die Auslenkungen der Federn sollen im Vergleich zur Federlänge

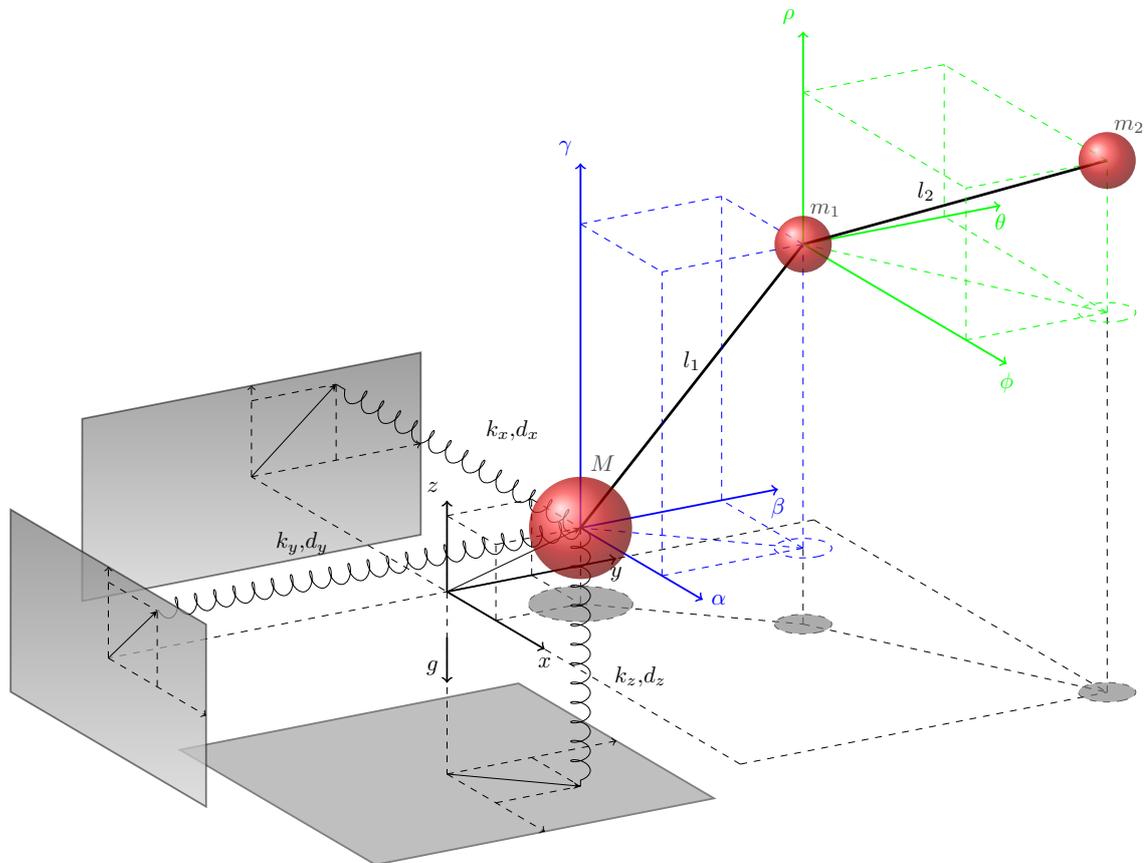


Abbildung 9.1.: Physikalisches Modell einer schwingungsfähigen mobilen Plattform.

sehr klein sein, so dass für die Rückstellkraft der Federn stets das *Hook'sche Gesetz* gelten soll: $F_R = -k_i s$. Dabei ist F_R die Rückstellkraft der Feder, k die Federkonstante und s die Auslenkung der Feder aus der Ruhelage. Das Minuszeichen bringt die Richtung der Kraft zum Ausdruck: diese wirkt immer gegen die Auslenkung zur Ruhelage hin. Die Dämpfungskraft wird wie bei einem klassischen gedämpften harmonischen Schwinger proportional zur Geschwindigkeit angesetzt: $F_D = -d_i \dot{s}$, wobei d für die Dämpfungskonstante des Systems und \dot{s} die Geschwindigkeit des Massenpunkts steht. Die Dämpfungskraft wirkt immer entgegen der Bewegungsrichtung, aber nur wenn sich der Massenpunkt bewegt. Damit ist je nach Wahl der physikalischen Konstanten $k_{x,y,z}$, $d_{x,y,z}$ und M ein in drei Richtungen gedämpftes schwingungsfähiges System allgemein beschrieben.

Der Roboterarm als Aufbau der mobilen Plattform wird durch ein inverses Doppelpendel mit aktiven Gelenken modelliert. Dieses besteht aus zwei kleineren Massen m_1 und m_2 , die nacheinander durch Kugelgelenke mit festen Gelenkarmen der Länge l_1 und l_2 mit der großen Masse M verbunden sind. Die Position der Masse m_1 wird im

blau dargestellten KS mit den Achsen α , β und γ beschrieben. Der Ursprung dieses KS liegt im Massenmittelpunkt der Masse M . Die Masse m_2 bewegt sich im grün dargestellten KS mit dem Ursprung im Massenmittelpunkt der Masse m_1 und den Achsenbezeichnungen ϕ , θ und ρ . Die Koordinatensysteme gehen durch Verschiebung der Ursprünge auseinander hervor. Die Orientierung der Achsen ändert sich nicht. In der Ruhelage des Systems befindet sich die Masse M im Mittelpunkt des raumfesten KS und der Roboterarm ist nach oben ausgerichtet. Die Bewegung des Roboterarms beeinflusst die Schwingung des Systems im großen Maße und wird im Folgenden dazu benutzt unerwünschte Schwingungen zu unterdrücken.

Bei der Gestaltung des physikalischen Modells standen folgende Punkte im Vordergrund:

- Allgemeingültigkeit bzw. Anpassbarkeit des Modells: Das hier vorgestellte Modell soll nicht eine bestimmte mobile Plattform beschreiben, sondern möglichst viele Parameter enthalten, die eine Adaption des Modells an die vorliegende Bauform erlauben.
 - *Feder und Dämpfungskonstante*: In der physikalischen Beschreibung können Parameter, wie die Feder- und die Dämpfungskonstante, in alle drei Raumrichtungen voneinander unabhängig gewählt werden.
 - *Beweglichkeit der Gelenke*: Die Gelenke des Roboterarms sind als Kugelgelenke modelliert. Die Bewegungsfreiheit der Gelenke kann je nach Bauweise eingeschränkt werden.
 - *Frei wählbare Massenpunkte*: Die Masse der Plattform und der Gelenke des Doppelpendels können der jeweiligen Bauform angepasst werden.
- Einfaches Modells:
 - *Hook'sches Gesetz*: Für das schwingungsfähige System gilt das einfache lineare Hook'sche Gesetz $F_R = -ks$. Die Federn werden nur entlang der Längsachse beansprucht.
 - *Klassische gedämpfte Schwingung*: Die Dämpfungskraft des Systems ist proportional zur Geschwindigkeit modelliert $F_D = -d\dot{s}$. Sonst werden keine Reibungseffekte (z. B. Luftreibung) berücksichtigt.

Auf der Basis des hier beschriebenen physikalischen Systems sollen im folgenden Abschnitt Bewegungsgleichungen für die Bewegung der Masse M in Abhängigkeit von Bewegungen des Roboterarms abgeleitet werden.

9.2. Ableitung der Bewegungsgleichungen

Die Bewegungsgleichungen für das eben beschriebene physikalische System werden nach dem Lagrange'schen Prinzip der klassischen Mechanik abgeleitet. Dazu wird

die Lagrangefunktion aufgestellt, die sich aus der kinetischen und der potentiellen Energie wie folgt zusammensetzt

$$L = T - V. \quad (9.1)$$

T steht dabei für die kinetische und V für die potentielle Energie. Diese ergeben sich zu

$$T = \frac{1}{2}M (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2}m_1 [(\dot{x} + \dot{\alpha})^2 + (\dot{y} + \dot{\beta})^2 + (\dot{z} + \dot{\gamma})^2] \\ + \frac{1}{2}m_2 [(\dot{x} + \dot{\alpha} + \dot{\phi})^2 + (\dot{y} + \dot{\beta} + \dot{\theta})^2 + (\dot{z} + \dot{\gamma} + \dot{\rho})^2], \quad (9.2)$$

$$V = \underbrace{Mgz + m_1g(z + \gamma) + m_2g(z + \gamma + \rho)}_{\text{pot. Energie im Schwerfeld der Erde}} + \underbrace{\frac{1}{2}(k_x x^2 + k_y y^2 + k_z z^2)}_{\text{pot. Energie der Federn}}. \quad (9.3)$$

Alle Bezeichnungen korrespondieren mit denen in Abbildung 9.1. Die Bewegungsenergien der Massen M , m_1 und m_2 resultieren aus dem Produkt der Masse mit der zeitlichen Ableitung des entsprechenden Ortsvektors zum Quadrat und einem Faktor $\frac{1}{2}$. Da die Ursprünge der KS nur gegeneinander verschoben sind, ohne dass sich die Orientierung ändert, ist der Ortsvektor einfach die Summe der entsprechenden Achsenkoordinaten. Die Beiträge der Bewegungsenergien treten in der Formel (9.2) als Summanden auf.

Die potentielle Energie (9.3) setzt sich aus zwei Beiträgen zusammen: der potentiellen Energie im Schwerfeld der Erde und der potentiellen Energie der Federn. Da die Erdbeschleunigung g in die negative z -Richtung des raumfesten KS zeigt, sind nur die ' z '-Komponenten des Ortsvektors für den Beitrag zur potentiellen Energie von Bedeutung. Das Potential der Feder ist wegen der Annahme der Gültigkeit des Hook'schen Gesetzes quadratisch in der Ortskoordinate, weil zwischen der Kraft und dem Potential die Beziehung $\vec{\nabla}V = -\vec{F}$ gilt.

Da die Längen der Gelenkarme l_1 und l_2 konstant sind, können die Koordinaten γ bzw. ρ über die Koordinaten α , β bzw. ϕ , θ ausgedrückt und in die Gleichungen (9.2) und (9.3) eingesetzt werden. Die Gleichungen für γ , $\dot{\gamma}$ und $\ddot{\gamma}$ ergeben sich zu

$$\gamma = \sqrt{l_1^2 - \alpha^2 - \beta^2}, \quad (9.4)$$

$$\dot{\gamma} = -\frac{\alpha\dot{\alpha} + \beta\dot{\beta}}{\sqrt{l_1^2 - \alpha^2 - \beta^2}}, \quad (9.5)$$

$$\ddot{\gamma} = \frac{1}{2} \frac{\alpha\dot{\alpha} + \beta\dot{\beta}}{\sqrt{(l_1^2 - \alpha^2 - \beta^2)^3}} - \frac{\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2 + \alpha\ddot{\alpha} + \beta\ddot{\beta}}{\sqrt{l_1^2 - \alpha^2 - \beta^2}}. \quad (9.6)$$

Für ρ , $\dot{\rho}$ und $\ddot{\rho}$ erhält man aus den Gleichungen (9.4) bis (9.6) entsprechende Beziehungen wenn man für α und β ϕ bzw. θ bzw. die entsprechenden Zeitableitungen

einsetzt. Wie schon bei der Betrachtung des einfachen Pendels wird hier auf eine Fallunterscheidung in (9.4) verzichtet und nur der positive Ausdruck betrachtet. Der Bewegungsraum für den Roboterarm ist damit auf den oberen Halbraum des jeweiligen KS beschränkt.

Im nächsten Schritt werden Bewegungsgleichungen für die Koordinaten x , y und z nach der Vorschrift (4.5) abgeleitet. Für die Koordinate x ergibt sich somit für die linke und die rechte Seite von (4.5)

$$\frac{\partial L}{\partial x} = -k_x x, \quad (9.7)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = M\ddot{x} + m_1(\ddot{x} + \ddot{\alpha}) + m_2(\ddot{x} + \ddot{\alpha} + \ddot{\phi}). \quad (9.8)$$

Auf der rechten Seite (9.8) muss noch die Dämpfungskraft mit $F_D = -d_x \dot{x}$ berücksichtigt werden. Die Gleichungen werden anschließend gleich gesetzt und nach \ddot{x} aufgelöst. Es ergibt sich als Bewegungsgleichung für die x -Richtung

$$\ddot{x} = -\frac{1}{M + m_1 + m_2} (k_x x + d_x \dot{x} + m_1 \ddot{\alpha} + m_2(\ddot{\alpha} + \ddot{\phi})). \quad (9.9)$$

Die Richtigkeit der Vorzeichen in der Gleichung (9.9) ist leicht überprüfbar. Dazu wird die Ortskoordinate x und die dazugehörige Geschwindigkeit \dot{x} gleich Null gesetzt. Werden die Massen m_1 und m_2 in Richtungen α und ϕ beschleunigt, erfährt die Masse M eine Beschleunigung in die negative x -Richtung. Vor dem Hintergrund des physikalischen Modells aus Abbildung 9.1 erscheint dies richtig.

Da die Ortskoordinaten x und y im physikalischen Modell aus Symmetriegründen völlig austauschbar sind, lässt sich die Gleichung für \ddot{y} durch Ersetzen der Koordinaten α und ϕ durch β und θ in der Gleichung 9.9 direkt angeben:

$$\ddot{y} = -\frac{1}{M + m_1 + m_2} (k_y y + d_y \dot{y} + m_1 \ddot{\beta} + m_2(\ddot{\beta} + \ddot{\theta})). \quad (9.10)$$

Selbstverständlich müssen auch die physikalischen Konstanten k_y und d_y entsprechend angepasst werden. Eine mathematische Ableitung nach der Vorschrift (4.5) liefert ohne die eben beschriebene Symmetrieüberlegung das gleiche Ergebnis.

Analog lässt sich die Bewegungsgleichung für \ddot{z} angeben:

$$\ddot{z} = -\frac{1}{M + m_1 + m_2} (k_z z + d_z \dot{z} + m_1 \ddot{\gamma} + m_2(\ddot{\gamma} + \ddot{\rho}) + g(M + m_1 + m_2)). \quad (9.11)$$

Die Bewegungsgleichung (9.11) unterscheidet sich von den Gleichungen (9.9) und (9.10) durch einen Summanden, der aus der potentiellen Energie des Schwerfeldes

der Erde resultiert. Auch das entspricht der physikalischen Intuition. Für $\tilde{\gamma}$ ist (9.6) bzw. für $\tilde{\rho}$ die entsprechende Beziehung in (9.11) einzusetzen.

Mit den Gleichungen (9.9), (9.10) und (9.11) ist das physikalische System, das in Abbildung 9.1 dargestellt ist, mathematisch erfasst. Im nächsten Schritt wird ein Zustandsregler berechnet, der das System gegen unerwünschte Schwingungen stabilisieren wird.

9.3. Mathematische Ableitung eines Riccati-Reglers

Zur eindeutigen Beschreibung des Systemzustandes des oben beschriebenen physikalischen Systems wird ein vierzehndimensionaler Zustandsvektor mit folgenden Elementen eingeführt

$$\mathbf{x} = \left(x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}, \alpha, \dot{\alpha}, \phi, \dot{\phi}, \beta, \dot{\beta}, \theta, \dot{\theta} \right)^T. \quad (9.12)$$

Das Steuersignal der Regelung ist

$$\mathbf{u} = \left(\ddot{\alpha}, \ddot{\phi}, \ddot{\beta}, \ddot{\theta} \right)^T. \quad (9.13)$$

Die ersten sechs Elemente des Zustandsvektors (9.12) beschreiben die Bewegung der Masse M bei der Auslenkung aus der Ruhelage und die letzten acht die Konfiguration des Roboterarms. Der Steuervektor präsentiert die Beschleunigungen der Massen m_1 bzw. m_2 im blau bzw. grün markiertem KS. Alle Bezeichnungen sind entsprechend der Abbildung 9.1 gewählt.

Im nächsten Schritt werden die Systemmatrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} linearisiert. Bei der Wahl des Arbeitspunkt sind zwei Faktoren entscheidend:

1. Die Wirkung des Reglers sollte gegen Schwingungen in Hauptbewegungsrichtungen am wirksamsten sein. Im physikalischen Modell in Abbildung 9.1 sind die x - und y -Richtungen völlig gleichberechtigt, die z -Richtung ist dadurch ausgezeichnet, dass die Gewichtskraft in ihre negative Richtung zeigt. In den meisten Fällen wird die Plattform auf einer waagrechten Unterlage in x - oder y -Richtung bewegt. Es ist davon auszugehen, dass durch Beschleunigen und Abbremsen Schwingungen vor allem in diese Richtungen angeregt werden. Mit dieser Begründung werden hier x und y als Hauptschwingungsrichtungen gewählt und als solche bezeichnet.
2. Die Konfiguration des Roboterarms im Arbeitspunkt sollte möglichst „natürlich“ sein. D. h. der Roboterarm sollte die Home-Position oder eine Konfiguration in ihrer Nähe als Ruhe- oder Ausgangsposition einnehmen, um das gewohnte Gleichgewicht der Plattform nicht zu beeinflussen.

Mit diesen Vorgaben wird der Arbeitspunkt $\mathbf{x}_0 = \mathbf{0}$ gewählt. In diesem Arbeitspunkt ist die Basis der mobilen Plattform in der Ruhelage in Ruhe (die ersten sechs Elemente

des Zustandsvektors \mathbf{x}_0 sind Null). Der Roboterarm ist nach oben ausgestreckt und ebenfalls in Ruhe (die letzten acht Elemente von \mathbf{x}_0 sind ebenfalls Null). Sei $M^* = M + m_1 + m_2$, dann ergibt sich mit diesem Arbeitspunkt nach (4.13) für

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_x}{M^*} & -\frac{d_x}{M^*} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_y}{M^*} & -\frac{d_y}{M^*} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_z}{M^*} & -\frac{d_z}{M^*} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9.14)$$

und

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{m_1+m_2}{M^*} & -\frac{m_2}{M^*} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{m_1+m_2}{M^*} & -\frac{m_2}{M^*} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9.15)$$

Bei genauer Betrachtung von (9.15) stellt man fest, dass das Steuersignal \mathbf{u} keine Auswirkung auf die zeitliche Entwicklung der Zustände z und \dot{z} hat. Die Zeilen fünf und sechs haben keine Einträge ungleich Null (blaue Einträge). Damit kann eine Schwingung in z -Richtung nicht mit dem Steuersignal \mathbf{u} beeinflusst werden und das System ist damit offensichtlich nicht steuerbar.

Die fehlende Steuerbarkeit ist eine Folge der Wahl des Arbeitspunkts $\mathbf{x}_0 = \mathbf{0}$. Eine Möglichkeit das System steuerbar zu machen, ist die Zustände z und \dot{z} aus der Betrachtung zu eliminieren. Dies wird erreicht indem blau markierte Zeilen und Spalten

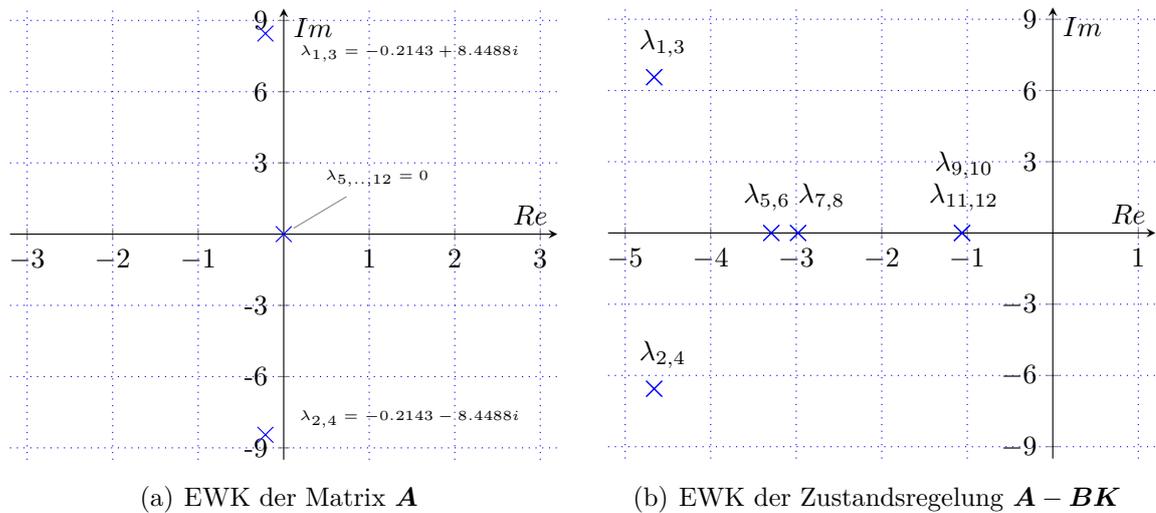


Abbildung 9.2.: EWK des Systems schwingungsfähige mobile Plattform mit Roboterarm:

- (a) EWK der Matrix \mathbf{A} zeigt zwei symmetrisch um die reelle Achse liegende jeweils zweifache Eigenwerte $\lambda_{1,2}$ und $\lambda_{2,4}$, die ein gedämpftes stabil schwingungsfähiges System charakterisieren. Der achtfache Eigenwert $\lambda_{5,\dots,12}$ steht für die Konfiguration des Roboterarms, die mit den Variablen α , ϕ , β und θ bzw. ihren zeitlichen Ableitungen beschrieben wird.
- (b) EWK der Zustandsregelung $\mathbf{A} - \mathbf{BK}$ charakterisiert einen stabilen Riccati-Regler mit sämtlichen Eigenwerten links der imaginären Achse.

in (9.14), (9.15) und die Zustände z , \dot{z} im Zustandsvektor weggelassen werden. Dies ist nur unter der Annahme möglich, dass x und y Hauptschwingungsrichtungen sind und keine Schwingung in z -Richtung angeregt werden kann oder nur sehr schlecht anregbar ist. Stellt man später in der Simulation oder im Experiment fest, dass diese Annahmen falsch waren, ist die Wahl eines neuen Arbeitspunktes notwendig.

Mit der Systembeschreibung (9.14) und (9.15) lässt sich die Rückkopplungsmatrix \mathbf{K} und die Vorfiltermatrix \mathbf{V} des Zustandsreglers berechnen. Alle Berechnungsschritte findet man im MATLAB-Skript im Anhang A.5.

Hier sollen wieder nur die EWK der Systemmatrix \mathbf{A} und des berechneten Reglers $\mathbf{A} - \mathbf{BK}$ diskutiert werden. Diese sind in Abbildung 9.2 dargestellt. Links findet man die EWK des dynamischen Systems ohne Regelung. Zwei zweifache um die reelle Achse symmetrisch liegende Eigenwerte von \mathbf{A} charakterisieren ein gedämpftes stabil schwingungsfähiges dynamisches System, um eine feste Ruhelage. Die Dämpfung kommt dadurch zum Ausdruck, dass die Eigenwerte leicht links von der imaginären Achse liegen. Die Ordnung zwei der Eigenwerte bringt die Tatsache zum Ausdruck, dass das System zwei identische Schwingungsrichtungen x und y hat, die durch identische Feder- und Dämpfungskonstanten ($k_x = k_y$, $d_x = d_y$) charakterisiert werden. Der achtfache Eigenwert $\lambda_{5,\dots,12}$ charakterisiert die Roboterarmkonfiguration, die mit Hilfe der Koordinaten α , ϕ , β und θ und ihren zeitlichen Ableitungen beschrieben wird.

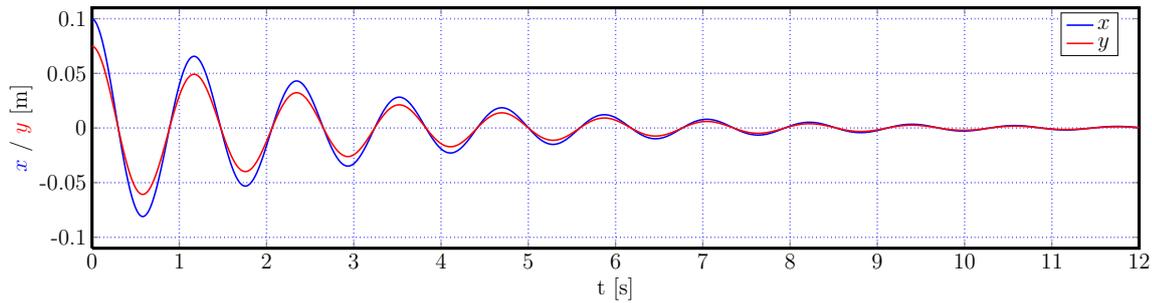


Abbildung 9.3.: Simulationsergebnisse Mobile Plattform in Simulink, Teil 1: freie gedämpfte Schwingung der mobilen Plattform aus Abbildung 9.1 in Richtungen x und y aufgrund von Anfangsauslenkungen $x_0 = 0.1$ m und $y_0 = 0.075$ m.

Auf der rechten Seite der Abbildung 9.2 ist die EWK des Zustandsreglers zu sehen. Hier liegen sämtliche Eigenwerte links der imaginären Achse und charakterisieren den Regler damit als stabil.

9.4. Simulationen und Simulationsergebnisse

9.4.1. Modellsimulation in Simulink

Die Abbildungen im Anhang B.5 und B.6 zeigen ein Modell des in Abbildung 9.1 präsentierten physikalischen Systems einer mobilen Plattform in Simulink. Die Struktur des Simulink-Modells ist dem aus Abbildung 4.8 sehr ähnlich. Es unterscheidet sich nur im Inhalt des Blocks 'Physikalisches Modell des Systems' und den Dimensionen des Zustandsvektors \mathbf{x} und des Steuersignals \mathbf{u} . Die Abbildung im Anhang B.6 zeigt den Inhalt des Blocks 'Physikalisches Modell des Systems'. Die wesentlichen Blöcke dieses Untersystems sind die blau gezeichneten MATLAB-Funktionen 'xpp' und 'ypp', die für die Bewegungsgleichungen (9.9) und (9.10) stehen. Von links nach rechts schließt sich eine zweistufige Integration aller Beschleunigungen an, so dass man im Rechten Teil des Untersystems den Zustandsvektor des Systems in der richtigen Reihenfolge stehen hat. Dieser bildet den Ausgang des physikalischen Systems.

Nun folgen drei Abbildungen, welche die Ergebnisse der Simulink-Simulationen darstellen. Alle Konstanten des physikalischen Modells sind im MATLAB-Skript im Anhang A.5, mit dem auch der Zustandsregler für das System berechnet wird zusammengefasst. Abbildung 9.3 zeigt ein Experiment, bei dem das physikalische System vom Regler abgekoppelt ist. Das physikalische System ist sich selbst überlassen und schwingt nach einer Anfangsauslenkung $x_0 = 0.1$ m und $y_0 = 0.075$ m mit einer Periodendauer von ca. 1.2 s in x - und y -Richtung in Phase. Die Schwingung ist nach ca. 12 s abgeklungen. Mit Hilfe der Konstanten M , m_1 , m_2 , k_x , k_y , d_x und d_y können nahezu beliebige Schwingungsdauer und Dämpfungen eingestellt werden.

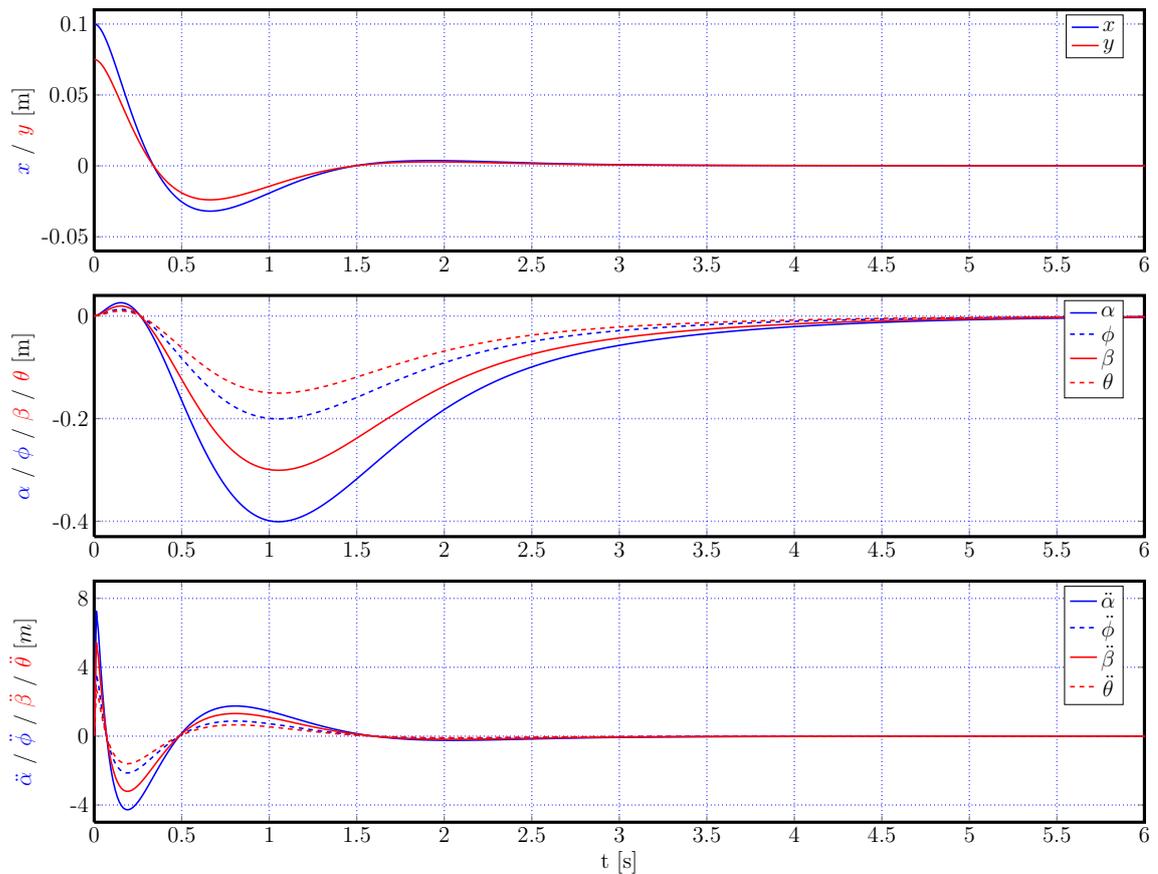


Abbildung 9.4.: Simulationsergebnisse Mobile Plattform in Simulink, Teil 2: gedämpfte Schwingungen der mobilen Plattform ausgelöst durch Anfangsauslenkungen $x_0 = 0.1$ m und $y_0 = 0.075$ m werden durch Armbewegungen ausgeglichen. Im oberen Teildiagramm ist die Auslenkung des Schwerpunkts der mobilen Plattform x (blau) und y (rot), im mittleren die Gelenkwinkel des Roboterarms α (blau), ϕ (blau gestrichelt), β (rot) und θ (rot gestrichelt), und unten das vierdimensionale Steuersignal $\mathbf{u} = (\ddot{\alpha}, \ddot{\phi}, \ddot{\beta}, \ddot{\theta})^T$ in der dem mittleren Diagramm entsprechenden Darstellung zu sehen.

Abbildung 9.4 zeigt einen Versuch, bei dem die Anfangsauslenkungen aus dem ersten Experiment durch Armbewegungen unterdrückt werden. Im oberen Diagramm findet man die Auslenkung des Schwerpunkts der mobilen Plattform aus der Ruhelage x (blau) und y (rot). Eine Schwingung, die wie schon im ersten Versuch durch Anfangsauslenkungen $x_0 = 0.1$ m und $y_0 = 0.075$ m angeregt wird, wird sehr effektiv innerhalb von ca. 1.5 s unterdrückt. Im mittleren Diagramm ist die Bewegung des Roboterarms dargestellt. Die Größen α (blau), ϕ (blau gestrichelt), β (rot) und θ (rot gestrichelt) beschreiben die Projektionen der Massen m_1 und m_2 auf die Achsen α , ϕ , β und θ (vgl. Abbildung 9.1). Hier wird deutlich, dass die Verbindung zur Masse m_1 mehr geneigt wird (große Ausschläge von α und β), während die obere Verbindung

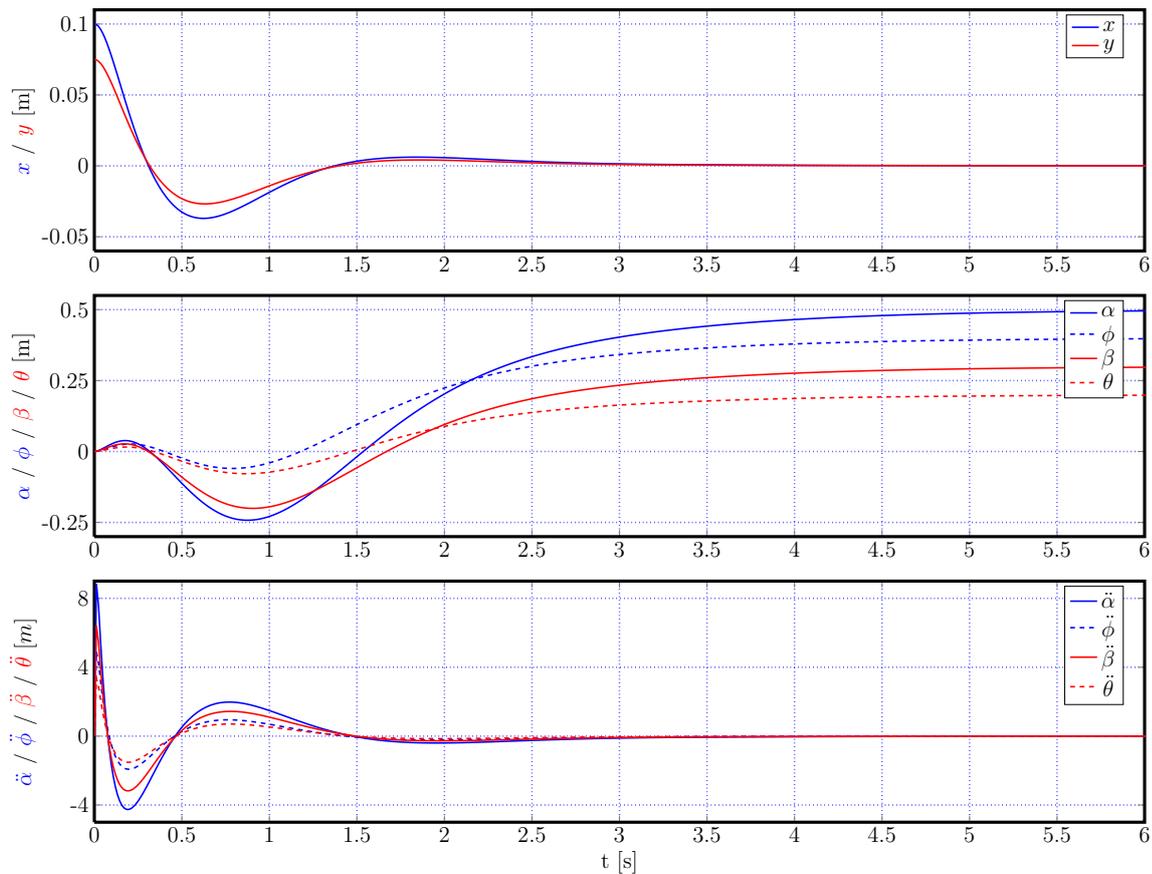


Abbildung 9.5.: Simulationsergebnisse Mobile Plattform in Simulink, Teil 3: Unterdrückung von gedämpften Schwingungen der mobilen Plattform durch Armbewegungen wird durch einen Vorpositionierungsvorgang des Arms überlagert. Die Anfangskonfiguration des Roboterarms $(\alpha_0 = 0, \phi_0 = 0, \beta_0 = 0, \theta_0 = 0)^T$ m wird in eine Endkonfiguration $(\alpha = 0.5, \phi = 0.4, \beta = 0.3, \theta = 0.2)^T$ m übergeführt.

zur Masse m_2 die Tendenz zeigt ihre aufrechte Position zu behalten. Das Einnehmen der Ausgangskonfiguration $(\alpha = 0, \phi = 0, \beta = 0, \theta = 0)^T$ m dauert ca. 4.5 s. Damit ist der Ausgleichsvorgang zu Ende.

Für die physikalische Ausführbarkeit des Experiments in der Realität ist es wichtig die auftretenden Beschleunigungen zu betrachten. Diese bilden die Grenzen der Ausführbarkeit und sind im unteren Diagramm der Abbildung dargestellt. Die Farbdarstellung entspricht der aus dem mittleren Diagramm. Man beachte, dass die hier gezeigten Beschleunigungen, die das Steuersignal \mathbf{u} des Reglers bilden in $[m/s^2]$ angegeben sind und nicht etwa in rad/s^2 , da es sich im mittleren Diagramm um Projektionen der Massen $m_{1/2}$ auf die entsprechenden Achsen handelt. Im MATLAB-Skript im Anhang A.5 ist die maximale Beschleunigung auf $a_{max} = 10 m/s^2$ gesetzt. Diese wird mit einem Spitzenwert von ca. $7 m/s^2$ für $\ddot{\alpha}$ nicht ganz erreicht. Alle anderen

Maximalwerte liegen deutlich unter diesem Wert und treten entsprechend der größten Auslenkung zum Zeitpunkt $t = 0$ am Anfang des Experiments auf.

Abbildung 9.4 zeigt ein ähnliches Experiment bei dem neben der Schwingungsunterdrückung noch eine Vorpositionierung des Roboterarms stattfindet. Solch eine Überlagerung beider Vorgänge ist dann wichtig, wenn man für den Roboterarm eine Aufgabe vor dem Verfahren der Plattform bereits geplant hat und den Arm für diese Aufgabe zeitsparend vorpositionieren möchte. Hier wird der Roboterarm aus der Ausgangsposition $(\alpha_0 = 0, \phi_0 = 0, \beta_0 = 0, \theta_0 = 0)^T$ m in die Position $(\alpha = 0.5, \phi = 0.4, \beta = 0.3, \theta = 0.2)^T$ m gefahren. Der Vorpositionierungsvorgang, der hier von einer Ausgleichsbewegung überlagert wird, dauert mit ca. 4.5 s nicht länger als der Stabilisierungsvorgang aus dem vorhergehenden Versuch. Im unteren Diagramm ist wieder das dazugehörige Steuersignal \mathbf{u} dargestellt. Hier liegt der höchste Spitzenwert mit ca. 9 m/s^2 für $\ddot{\alpha}$ wie auch alle anderen Spitzenwerte leicht über den Spitzenwerten aus dem Versuch davor.

9.4.2. Physikalische Nachbildung und Simulation einer mobilen Plattform mit Bullet

Das in Abbildung 9.1 gezeigte physikalische Modell wurde als Bullet-Modell nachgebildet. Ein Ausschnitt aus der graphischen Darstellung ist in Abbildung 9.6 dargestellt. Das Modell besteht aus einem Quader der Masse 100 kg, der die Basis einer Plattform simuliert. Der Quader ist an vier Rädern mit Federung aufgehängt. Die Vorderräder lassen sich in einem bestimmten Bereich lenken. Auf Tastendruck lässt sich die Plattform über den Antrieb der Hinterräder beschleunigen bzw. durch Bremswirkung aller Räder abbremsen. Der Roboterarm ist mit zwei 1 m langen Zylindern der Masse $m_1 = 10 \text{ kg}$ und $m_2 = 5 \text{ kg}$ modelliert, die untereinander durch ein Kugelgelenk verbunden sind. Der Roboterarm ist durch ein weiteres Kugelgelenk an der oberen Fläche der Basis befestigt. Im Hintergrund des Bildes erkennt man in türkis eine schiefe Ebene, die zu Testzwecken mit ins Modell aufgenommen wurde. Die Plattform kann in der Simulationsumgebung beliebig beschleunigt und verfahren werden.

Bullet stellt zur Modellierung von einfachen Fahrzeugen eine Klasse `btRaycastVehicle` zur Verfügung. Es ist nicht genau untersucht worden wie genau die Federung der Räder modelliert ist. Da man bei einem realen Aufbau auch nur in den seltensten Fällen weiß, woher genau die Federwirkung kommt, macht diese Tatsache die Simulation realistischer. Die physikalischen Reglerparameter $k_{x,y,z}$ und $d_{x,y,z}$ müssen mehr 'nach Gefühl' angepasst werden. Alle Konstanten, Parameter und die Berechnung des Zustandsreglers sind im MATLAB-Skript im Anhang A.10 zusammengefasst.

In Abbildung 9.7 sind zwei Versuche zusammenfassend dargestellt. Bei beiden wird die mobile Plattform in Richtung x bzw. ϕ beschleunigt und anschließend abrupt abgebremst. Nur im zweiten Versuch ist der Regler aktiv. Die Beschleunigungsphase

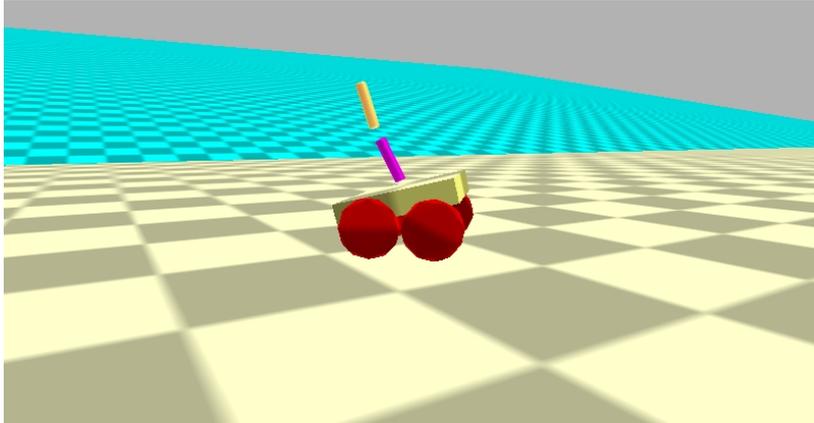


Abbildung 9.6.: Ein Ausschnitt aus der graphischen Darstellung einer mobilen Plattform mit einem Roboterarm als Aufbau bei einem Abbremsmanöver. Der Ausgleich der Schwingung erfolgt durch eine Bewegung des Roboterarms.

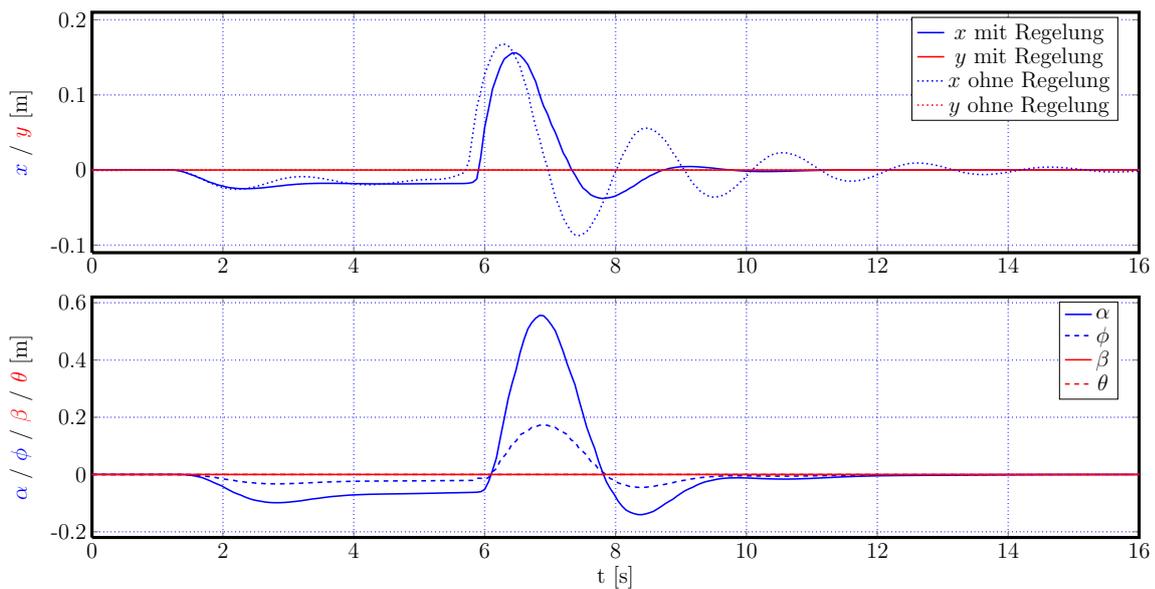


Abbildung 9.7.: Ein Überblick über die Ergebnisse eines Versuchs mit einer mobilen Plattform als Bullet-Simulation. Bei diesem Experiment wird die mobile Plattform beschleunigt (Start bei ca. $t = 1.5$ s) und dann abrupt abgebremst (Start der Abbremsphase bei ca. $t = 5.8$ s). Gepunktet sind im oberen Diagramm die Werte bei nicht aktivem Regler eingezeichnet. Der Verlauf zeigt eine gedämpfte Schwingung. Mit durchgezogener Linie sind die Werte bei aktivem Regler dargestellt. Das untere Teildiagramm zeigt die Bewegung des Roboterarms.

beginnt bei ca. $t = 1.5\text{ s}$ und endet bei ca. $t = 5.8\text{ s}$. Hier beginnt die Abbremsphase. Sie endet mit dem völligen Stillstand des mobilen Roboters. Dieses für eine mobile Plattform typische Fahrverhalten erzeugt gedämpfte Schwingungen der Basis, die im oberen Diagramm gepunktet eingezeichnet sind. Es ist eine stark gedämpfte Schwingung mit einer Periodendauer von ca. 2 s .

Im Vergleich dazu sind die Ergebnisse des zweiten Versuchs ebenfalls ins Diagramm eingezeichnet. Als erstes fällt auf, dass obwohl die Beschleunigungsphase länger dauert und damit die Endgeschwindigkeit und die kinetische Energie größer sind, die Spitze des ersten Ausschlags kleiner ausfällt als die aus dem ersten Versuch. Die Schwingung ist nach einer Periode (ca. 2.1 s) ausgelöscht. Die kleinen Schwingungen in der Beschleunigungsphase werden ebenfalls unterdrückt.

Im unteren Diagramm ist die Armbewegung dargestellt. Die Ausgleichsbewegung wird am Anfang der Beschleunigungsphase durch die Abweichung des Basismittelpunkts aus der Ruhelage ausgelöst. Ein großer Ausschlag in α und ϕ beim Abbremsmanöver folgt der großen Auslenkung von x . Die Werte von ϕ , die der Bewegung des oberen Gelenks entsprechen sind im gesamten Verlauf um einen Faktor von ca. 2.5 kleiner. Das heißt, dass bei dieser Ausgleichsbewegung das untere Gelenk stärker kippt als das obere, wie es in Abbildung 9.6 zu sehen ist.

Dadurch dass die mobile Plattform bei diesen Experimenten nur in x -Richtung beschleunigt wird, wird auch nur eine ebene Schwingung in der x - z -Ebene angeregt; y und damit β und θ sind über den gesamten Verlauf des Experiments unverändert gleich Null. Nur in scharfen Kurven oder durch einen Einfluss von außen können Schwingungen in y -Richtung angeregt werden. Damit ist die Hauptschwingungsrichtung die Richtung x .

Der Fahrweg und die Beschleunigungen der Plattform sind hier nicht gezeigt, weil es keine Rolle spielt, woher die Schwingungen der Plattform kommen. Man könnte auch eine Schwingung durch Krafteinwirkung auf den Roboterarm anregen. Sobald eine Auslenkung der Basis aus der Ruhelage detektiert wird, wird der Regler aktiv und unterdrückt diese.

Der Regler ist bei diesem Versuch wie gewohnt als Simulink-Modell implementiert (vgl. Abbildung 4.11 (b)) und der Datenaustausch erfolgt über einen gemeinsamen Speicherbereich (vgl. Abbildung 4.11 (c)).

9.5. Stabilisierungs- und Transportsysteme für ein Pendel und eine Kugel auf einem Tablett im Einsatz auf einer mobilen Plattform

Da es für die in den Kapiteln 4 und 7 präsentierte Stabilisierungs- und Transportsysteme nicht von Bedeutung ist wie genau das dynamische System aus dem Gleichgewicht gebracht wird, sondern weil sie nur auf Abweichungen des Systems reagieren, kön-

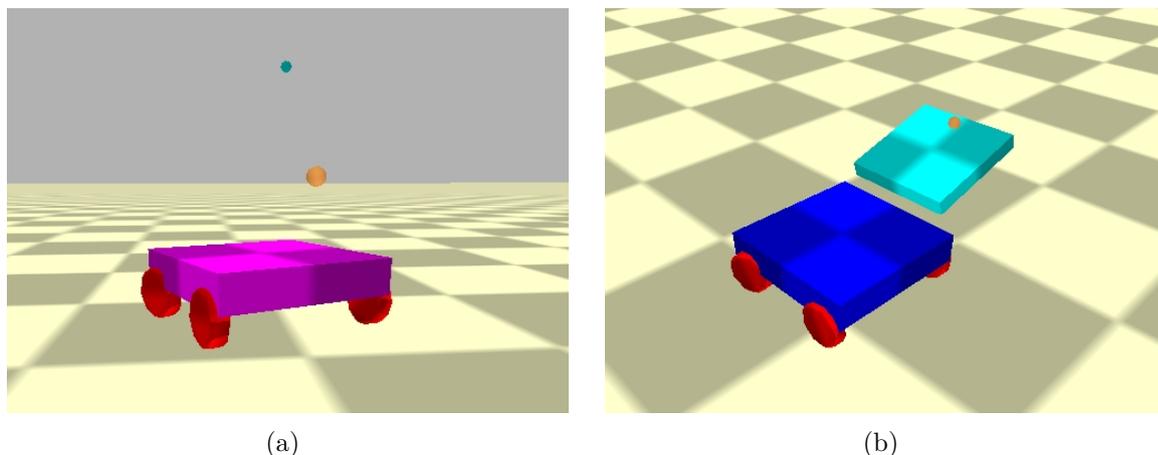


Abbildung 9.8.: Einsatzszenarien auf einer mobilen Plattform:

- (a) Eine hängende Last, modelliert als ein einfaches Pendel wird kontrolliert auf einer mobilen Plattform transportiert.
- (b) Eine Kugel wird durch den Einsatz eines beweglichen Tablettts bei Transport auf einer mobilen Plattform stabilisiert.

Für das in dieser Arbeit präsentierte Stabilisierungs- und Transportsystem spielt es keine Rolle durch welche Art von äußerer Einwirkung das dynamische System aus dem Gleichgewicht gebracht wird. Sobald eine Abweichung detektiert wird, wird das System durch den Regler stabilisiert.

nen sie sehr einfach auf mobilen Plattformen eingesetzt werden. Die Abbildungen 9.8 (a) und (b) zeigen ein Szenario bei dem Stabilisierungs- und Transportsysteme für ein Pendel und eine Kugel auf einem Tablett auf einer mobilen Plattform eingesetzt sind. In Beschleunigungsphasen, die auch Abbremsvorgänge und Kurvenfahrten mit einschließen, wirken auf die mobile Plattform und auf alle Gegenstände, die sich auf dieser befinden Kräfte. Wenn diese Kräfte zu groß werden, führt das dazu, dass lose Teile weg fliegen und hängende Lasten ausgelenkt werden und unkontrolliert zu schwingen anfangen.

In Abbildung 9.8 (a) ist gezeigt wie das Pendel in einer Kurve seitlich durch die Fliehkraft ausgelenkt wird und der Aufhängepunkt durch eine Ausgleichsbewegung mit nach außen geht, um keine Schwingung aufkommen zu lassen. Ähnlich dazu macht das Tablett eine Ausgleichsbewegung als die Kugel durch die Fliehkraft in einer Kurve nach außen gedrückt wird. Sowohl das Pendel als auch die Kugel können auch schon während der Fahrt gleichzeitig zum Stabilisierungsvorgang vorpositioniert werden, wenn man das weitere Vorgehen am Zielort bereits mit berücksichtigen möchte.

Wie bereits erwähnt sind für den Einsatz dieses Systems auf einer mobilen Plattform keinerlei Informationen über die Bewegung der Plattform nötig. Sobald es eine Abweichung gibt, greift der Regler ein und gleicht die Auslenkung aus. Als Manipulatoren für die Ausführung der Ausgleichsbewegung können beliebige bewegliche Aufbauten

9. Schwingungsausgleich beim Verfahren einer mobilen Plattform

eingesetzt werden, die für die Kontrolle genügend Freiheitsgrade haben, wie ein Roboterarm oder eine Stewart-Plattform. Wenn mehrere bewegliche Aufbauten auf der mobilen Plattform zur Verfügung stehen, könnten der Schwingungsausgleich der Basis und die Stabilisierung und Vorpositionierung der Last gleichzeitig erfolgen.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es eine einheitliche und systematische Vorgehensweise bei der Beschreibung von dynamischen Systemen, insbesondere Transportvorgängen zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurden fünf unterschiedliche Systeme unter Verwendung dieser Vorgehensweise untersucht

- **Pendel** (Kapitel 4)
- **inverses Pendel** (Kapitel 5)
- **zwei Pendel am Ende eines Stabes** (Kapitel 6)
- **Kugel auf Tablett** (Kapitel 7)
- **mobile Plattform** (Kapitel 9)

Der Ausgangspunkt der Beschreibungsstrategie ist ein *physikalisches Modell*. Dieses dient der Abstraktion und der Reduzierung des realen Systems auf wesentliche Merkmale und Parameter, die für das physikalische Verhalten des Systems relevant sind (vgl. Abbildungen 4.1, 6.1, 7.1 und 9.1). Die Parameter erlauben die Anpassung eines physikalischen Modells auf das reale System.

Auf der Basis des physikalischen Modells werden *Bewegungsgleichungen* für die relevanten Größen abgeleitet. Für das System Pendel ist das die Auslenkung des Pendels aus der Ruhelage α und β (vgl. (4.6) und (4.7)), für eine Kugel auf einem Tablett ist das der Abstand der Kugel vom Mittelpunkt des Tabletts x_b'' und y_b'' (vgl. (7.5) und (7.6)) und für alle anderen Systeme analog.

Unter der Annahme, dass die Bewegungsgleichungen das physikalische System vollständig beschreiben, wird ein Zustandsregler für das jeweilige System abgeleitet. Der Vorteil bei dem präsentierten Vorgehen ist eine direkte Ableitung des Reglers aus den Bewegungsgleichungen. Die Berechnungsvorschriften sind einheitlich für jedes System und erfordern kein tieferes Verständnis des Reglers. Die Systemperformance kann mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren in gewünschter Weise angepasst werden.

Im nächsten Schritt des Konzepts werden Simulationen des physikalischen Systems erstellt. Die Simulation erfolgt in zwei Stufen. Die erste Stufe bildet eine *Simulink-Simulation*, in der die abgeleiteten Bewegungsgleichungen und der Zustandsregler als Simulink-Modelle simuliert werden. Diese dient dazu die mathematische Richtigkeit des Reglers zu prüfen. In diesem Schritt können bereits die für eine effektive Regelung

benötigten Beschleunigungen des Manipulators ermittelt werden, da gerade diese die Güte der Performance limitieren.

In der zweiten Simulationsstufe wird eine physikalische Simulation des Systems erstellt. Mit dieser Simulation lässt sich sowohl das vereinfachte physikalische Modell (vgl. System Pendel) als auch komplexere Systeme, die der Realität näher kommen (vgl. System mobile Plattform), beschreiben. Ziel dieses Schritts ist das reale System so gut abzubilden, dass ein potentieller Regler für das System ohne Risiko und unter realistischen Bedingungen validiert werden kann. Die physikalische Simulation stellt zu jedem Zeitpunkt alle Informationen über den physikalischen Zustands des Systems zur Verfügung. Das bietet die Möglichkeit einer vollständigen Analyse des Systems und des Reglers.

In dieser Arbeit werden Experimente mit einem Pendel und einer Kugel auf einem Tablett präsentiert. Der Vergleich der Ergebnisse aus realen Experimenten mit den Ergebnissen aus der physikalischen Simulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung, so dass der in der Simulation optimierte Regler ohne Änderungen zur Regelung realer dynamischer Systeme eingesetzt werden kann. Es ist gelungen die physikalische Simulation dem realen Verhalten sehr gut anzupassen. Damit stellen die hier vorgestellten Systemsimulationen eine vollständige Testumgebung für potentielle Steuerungen und Regelungen dar.

10.1. Beiträge der Arbeit

Die wissenschaftlichen Beiträge dieser Arbeit sind im Folgenden zusammengestellt:

- Im Vorfeld dieser Arbeit wurde eine **umfassende Literaturrecherche** (vgl. Kapitel 3) der bekannten Transportsysteme gemacht. Es konnte aber keine einheitliche und systematische Beschreibung für dynamische Transportvorgänge gefunden werden.
- Die vorliegende Arbeit präsentiert **vollständige physikalische Modelle** und **mathematische Beschreibungen** der oben genannten Systeme.
- Mit dem Zustandsregler kommt hier ein klassischer Regler aus der modernen Regelungstechnik zum Einsatz. In dieser Arbeit wird eine **systematische Berechnung des Reglers** vorgeschlagen, mit der ein Riccati-Regler für **jedes beliebige nach [31] steuerbare dynamische System** berechnet werden kann. Durch die Linearisierung der Systembeschreibung wird ein **echtzeitfähiger Regler** zur Verfügung gestellt.
- Von allen hier behandelten Systemen wurden **vollständige Simulink- und Physik-Simulationen** erstellt. Diese stellen **zu jedem Zeitpunkt die vollständige Information über das System** zur Verfügung und werden zur vollständigen Analyse des Gesamtsystems benutzt.

- Einen sehr wichtiger Teil der Arbeit machten **reale Experimente** aus, die für die Systeme Pendel und Kugel auf einem Tablett zahlreich durchgeführt wurden. Abbildungen 4.4, 7.3 und 4.5 (a) zeigen die für die Versuche angefertigten Aufbauten. Ausgearbeitete **Methoden zur Kugelbeobachtung** werden in den Abbildungen 4.5 (b) und 7.4 erklärt.
- Der präsentierte Riccati-Regler wurde im Rahmen dieser Arbeit in **Simulink**, **MATLAB** und **C/C++ implementiert** und je nach Einsatzgebiet in Simulationen und in Experimenten validiert. Alle verwendeten Regler in Simulink sind im Anhang B und alle dazugehörigen Berechnungen mit MATLAB im Anhang A dokumentiert. Die Implementierung der Komponenten des Regelkreises in C/C++ wurde modular strukturiert (vgl. Abbildung 4.7). Der Regler kann somit durch andere ausgetauscht und ergänzt werden.
- Die in Kapiteln 4 und 7 vorgestellten Modelle wurden im Rahmen dieser Arbeit erfolgreich für den **Transport von Flüssigkeiten** im Raum verwendet. Die Transportvorgänge wurden sowohl in der Physik-Simulation als auch im Experiment getestet. Anhand einer detaillierten Diskussion der Ergebnisse aus der Simulation werden verschiedene Methoden des Transports von Flüssigkeiten herausgearbeitet (vgl. Kapitel 8).
- In Kapitel 9 wird ein Modell einer **schwingungsfähigen mobilen Plattform mit einem Roboterarm** als Aufbau vorgestellt. Hier wurde eine Methode ausgearbeitet, bei der die Bewegung des Roboterarms dazu benutzt wird die Schwingungen der Plattformbasis zu unterdrücken.
- Am Ende der Arbeit steht **ein Konzept, mit dem dynamische Systeme** und insbesondere **Transportvorgänge einheitlich** und **systematisch** behandelt werden können.

10.2. Zukünftige Arbeiten

Mit folgenden Punkten werden hier wichtige Themenbereiche angesprochen, die im Anschluss an diese Arbeit beleuchtet werden sollten.

- Für physikalische Simulationen wurde die Physik-Engine Bullet verwendet. Neben Bullet stehen noch weitere Physik-Engines zur Verfügung (z. B. ODE, SOFA usw.). Jede Engine hat ihre Stärken und Schwächen. Die Realität wird von verschiedenen Engines immer etwas unterschiedlich wiedergegeben. Für das hier vorgestellte Konzept wäre es gut mehrere Physik-Engines zu Verfügung zu haben, um für das jeweilige Experiment ein optimales Simulationsergebnis zu erzielen.

- Ein dynamischer Transport ist ein sicherheitskritischer Vorgang. Die Sicherheit der hier vorgestellten Vorgänge wird in dieser Arbeit nur indirekt behandelt. Für ein vollständiges Konzept müssten Sicherheitsaspekte definiert und in die Beschreibung mit aufgenommen werden.
- In dieser Arbeit wird zum Regeln von Systemen ein Zustandsregler verwendet. Der Grund dafür ist, dass sich ein Riccati-Regler direkt aus den Bewegungsgleichungen ableiten lässt und zu seiner Berechnung kein tiefes Verständnis des Reglers nötig ist. Die Aufnahme weiterer direkt ableitbarer Regler in die Betrachtung würde das Konzept dieser allgemeinen Beschreibung erweitern.
- Ein wichtiger Aspekt in der Robotik ist die kollisionsfreie Bahnplanung. Eine Kollision des Roboters mit sich selbst oder mit seiner Umgebung könnte schwerwiegende Folgen haben. Die Berücksichtigung der Dynamik einer zu transportierenden Last erschwert zusätzlich die Betrachtung und sollte in den zukünftigen Arbeiten untersucht werden.
- Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein optischer Sensor eingesetzt. Dieser ist außerhalb des Labors in der vorgestellten Form nur bedingt einsetzbar. Eine Untersuchung anderer Sensoren, wie des Kraft-Momenten-Sensors oder eines haptischen Sensors, müsste im Anschluss an diese Arbeit noch geleistet werden.
- Eine Untersuchung des hier präsentierten Konzepts zur Beschreibung von dynamischen Transportvorgängen in Bezug auf Energie-, Kraft- und Zeitoptimierung mit und ohne Einbeziehung des Manipulators steht ebenfalls noch aus und erfordert eine genaue Betrachtung.

A. Matlab-Skripte zur Berechnung des Riccati-Reglers

A.1. System Pendel in Simulink

```
% constants -----
clear;
clc;
g = 9.8;
l = 1.;

% start and end position of POS in workspace -----
x0 = 0.;
xp0 = 0.;
y0 = 0.;
yp0 = 0.;
z0 = -0.;
zp0 = 0.;

x_end = 1.;
y_end = 1.;
z_end = 1.;

% position of the pendulum in POS coordinate system -----
alpha0 = 0.;
alphap0 = 0.;
beta0 = 0.;
betap0 = 0.;

% delta limits -----
a_max = 10;

% linearisation of the system: xp = Ax+Bu; y = Cx; -----
%   alpha  alphap  beta  betap  x  xp  y  yp  z  zp
A = [ 0  1  0  0  0  0  0  0  0  0;
     -g/l  0  0  0  0  0  0  0  0  0;
       0  0  0  1  0  0  0  0  0  0;
       0  0  -g/l  0  0  0  0  0  0  0;
       0  0  0  0  0  1  0  0  0  0;
       0  0  0  0  0  0  0  0  0  0;
       0  0  0  0  0  0  0  1  0  0;
       0  0  0  0  0  0  0  0  0  0;
       0  0  0  0  0  0  0  0  0  1;
       0  0  0  0  0  0  0  0  0  0];

%   ux  uy  uz
B = [ 0  0  0;
     0 -1  0;
     0  0  0;
     -1  0  0;
     0  0  0;
     1  0  0;
     0  0  0;
     0  1  0;
     0  0  0;
     0  0  1];

C = [ 0  0  0  0  1  0  0  0  0  0;
     0  0  0  0  0  1  0  0  0  0;
     0  0  0  0  0  0  0  1  0  0];

% calculation of the feed back matrix K and the static performance matrix V
rank(ctrb(A,B));

Q=diag([50 5 50 5 30 20 30 20 30 20]);
R=diag([.1 .1 .1]);
```

```
[K,s,e]= lqr(A,B,Q,R);  
V = pinv(C*pinv(-(A-B*K))*B);
```

A.2. System inverses Pendel in Simulink

```
% constants -----  
clear;  
clc;  
g = 9.8;  
l = 1.;  
  
% position of POS in workspace -----  
x0 = 0.;  
xp0 = 0.;  
y0 = 0.;  
yp0 = 0.;  
z0 = 0.;  
zp0 = 0.;  
  
x_end = 0.;  
y_end = 0.;  
z_end = 0.;  
  
% position of the pendulum in POS coordinate system -----  
alpha0 = 0.;  
alphap0 = 0.;  
beta0 = .1;  
betap0 = 0.;  
  
% delta limits -----  
a_max = 10;  
  
% linearisation of the system: xp = Ax+Bu; y = Cx; -----  
% alpha alphap beta betap x xp y yp z zp  
A = [ 0 1 0 0 0 0 0 0 0;  
      g/l 0 0 0 0 0 0 0 0;  
      0 0 0 1 0 0 0 0 0;  
      0 0 g/l 0 0 0 0 0 0;  
      0 0 0 0 0 1 0 0 0;  
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;  
      0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;  
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;  
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 1;  
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];  
  
% ux uy uz  
B = [ 0 0 0 0;  
      0 -1 0;  
      0 0 0;  
      -1 0 0;  
      0 0 0;  
      1 0 0;  
      0 0 0;  
      0 1 0;  
      0 0 0;  
      0 0 1];  
  
C = [ 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;  
      0 0 0 0 0 1 0 0 0 0;  
      0 0 0 0 0 0 0 1 0 0];  
  
% calculation of the feed back matrix K and the static performance matrix V  
rank(ctrb(A,B));  
  
Q=diag([100 10 100 10 100 10 100 10 100 10]);  
R=diag([10 10 10]);  
  
%Q=diag([50 5 50 5 30 20 30 20 30 20]);  
%R=diag([10 10 10]);  
  
[K,s,e]= lqr(A,B,Q,R);  
V = inv(C*inv(-(A-B*K))*B);
```

A.3. System zwei Pendel an den Enden eines Stabes in Simulink

A.3. System zwei Pendel an den Enden eines Stabes in Simulink

```

% constants -----
clear;
clc;
g = 9.8;
d = 2;
l1 = 1.;
l2 = 1.;

% position of POS in workspace -----
x0 = 0.;
xp0 = 0.;
y0 = 0.;
yp0 = 0.;
z0 = 0.;
zp0 = 0.;
ad0 = 0.;
adp0 = 0.;
bd0 = 0.;
bdp0 = 0.;

% position of the pendulum in POS coordinate system -----
alpha0 = 0.2;
alphap0 = 0.;
beta0 = 0.2;
betap0 = 0.;
phi0 = 0.;
phip0 = 0.;
theta0 = 0.;
thetap0 = 0.;

% linearisation of the system: xp = Ax+Bu; y = Cx; -----
% alpha alphap beta betap phi phip theta thetap x xp y yp z zp ad adp bd bdp
A = [ 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      -g/l1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 -g/l1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 -g/l2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 -g/l2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0];

% xpp ypp zpp abpp bdp
B = [ 0 0 0 0 0 0;
      0 -1 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0;
      -1 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0;
      0 -1 0 -1 0 0;
      0 0 0 0 0 0;
      -1 0 0 0 -1;
      0 0 0 0 0;
      1 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0;
      0 1 0 0 0;
      0 0 0 0 0;
      0 0 1 0 0;
      0 0 0 0 0;
      0 0 0 1 0;
      0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 1];

C = [ 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0];

% calculation of the feed back matrix K and the static performance matrix V
rank(ctrb(A,B));

Q=diag([50 5 50 5 50 5 50 5 30 20 30 20 30 20 30 20 30]);
R=diag([0.1 0.1 0.1 0.1 0.1]);

[K,s,e]= lqr(A,B,Q,R);

```

```
V = pinv(C*pinv(-(A-B*K))*B);
```

A.4. System Kugel auf Tablett in Simulink

```
% constants -----
clear;
clc;
g = 9.8;
% position and velocity of the tray in workspace -----
x0 = 0.;
xp0 = 0.;
y0 = 0.;
yp0 = 0.;
z0 = 0.;
zp0 = 0.;

% orientation of the tray in workspace -----
alpha0 = 0.;
alphap0 = 0.;
beta0 = 0.;
betap0 = 0.;

% position and velocity of the ball on tray -----
xb0 = 0.;
xbp0 = 0.;
yb0 = 0.;
ybp0 = 0.;

xb_max=0.1;          % long distance transport saturation
x_max=0.3;

% delta limits -----
a_max_angle = .5;
a_max_lin = .5;

% linearisation of the system: xp = Ax+Bu; y = Cx; -----
%   xb  xbp  yb  ybp  alpha  alphap  beta  betap  x  xp  y  yp  z  zp
A = [0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0;
     0  0  0  0  0  0  -5/7*g  0  0  0  0  0  0  0;
     0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0;
     0  0  0  0  5/7*g  0  0  0  0  0  0  0  0  0;
     0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0;
     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0;
     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0;
     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0;
     0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0;
     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0;
     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1;
     0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0];

%   ualpha  ubeta  ux  uy  uz
B = [0  0  0  0  0;
     0  0  5/7  0  0;
     0  0  0  0  0;
     0  0  0  -5/7  0;
     0  0  0  0  0;
     1  0  0  0  0;
     0  0  0  0  0;
     0  1  0  0  0;
     0  0  0  0  0;
     0  0  1  0  0;
     0  0  0  0  0;
     0  0  0  1  0;
     0  0  0  0  0;
     0  0  0  0  1];

C = [ 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
     0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
     0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0];

% calculation of the feed back matrix K and the static performance matrix V
rank(ctrb(A,B));

%Q=diag([40 10 40 10 0.5 0.01 0.5 0.01 10 15 10 15 10 15]);
Q=diag([400 10 400 10 0.5 0.01 0.5 0.01 10 15 10 15 10 15]);
%Q=diag([4000 10 4000 10 0.5 0.01 0.5 0.01 10 15 10 15 10 15]);
```

```
R=diag([1 1 1 1]);
[K,s,e]=lqr(A,B,Q,R);
V=pinv(C*pinv(-(A-B*K))*B);
```

A.5. System mobile Plattform mit einem Roboterarm in Simulink

```
% constants -----
clear;
clc;
g = 9.8;
l1 = .5;
l2 = .5;
M = 50;
m1 = 10;
m2 = 10;
dx = 50;
dy = 50;
kx = 2000;
ky = 2000;

% deflection of M -----
x0 = 0.2;
xp0 = 0.;
y0 = 0.1;
yp0 = 0.;

% position of the masses m1 and m2 -----
alpha0 = 0.;
alphap0 = 0.;
phi0 = 0.;
phip0 = 0.;
beta0 = 0.;
betap0 = 0.;
theta0 = 0.;
thetap0 = 0.;

% delta limits -----
a_max = 10;

% linearisation of the system: xp = Ax+Bu; y = Cx; -----
a21=-kx/(M+m1+m2);
a22=-dx/(M+m1+m2);
a43=-ky/(M+m1+m2);
a44=-dy/(M+m1+m2);
%
%      x   xp   y   yp   a   ap   p   pp   b   bp   t   tp
A = [ 0   1   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0;
      a21 a22  0   0   0   0   0   0   0   0   0   0;
      0   0   0   1   0   0   0   0   0   0   0   0;
      0   0   a43 a44  0   0   0   0   0   0   0   0;
      0   0   0   0   0   1   0   0   0   0   0   0;
      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0;
      0   0   0   0   0   0   0   0   1   0   0   0;
      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0;
      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   1   0;
      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0;
      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   1;
      0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0;];

b21 = -(m1+m2)/(M+m1+m2);
b22 = -m2/(M+m1+m2);
%      app ppp bpp tpp
B = [ 0   0   0   0;
      b21 b22  0   0;
      0   0   0   0;
      0   0   b21 b22;
      0   0   0   0;
      1   0   0   0;
      0   0   0   0;
      0   1   0   0;
      0   0   0   0;
      0   0   1   0;
      0   0   0   0;
      0   0   0   1;];

C = [0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;];
```

A. Matlab-Skripte zur Berechnung des Riccati-Reglers

```
% calculation of the feed back matrix K and the static performance matrix V
rank(ctrb(A,B));

Q = diag([10 100 10 100 1 1 1 1 1 1 1]);
R = diag([.1 .1 .1 .1]);

[K,s,e]= lqr(A,B,Q,R);
V = inv(C*pinv(-(A-B*K))*B);
```

A.6. System Pendel in Bullet

```
% constants -----
clear;
clc;
g = 9.8;
l = 0.6;

% position of POS in workspace -----
x0 = 0.;
xp0 = 0.;
y0 = 0.;
yp0 = 0.;
z0 = -0.;
zp0 = 0.;
x_end = 0.;
y_end = 0.;
z_end = 0.;

% position of the pendulum in POS coordinate system -----
alpha0 = 0.;
alphap0 = 0.;
beta0 = 0.;
betap0 = 0.;

% delta limits -----
a_max = 10;

% linearisation of the system: xp = Ax+Bu; y = Cx; -----
% alpha alphap beta betap x xp y yp z zp
A = [ 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0;
     -g/l 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 1 0 0 0 0 0;
      0 0 -g/l 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 1 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 1 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 1;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0];

% ux uy uz
B = [ 0 0 0; % B muss noch angepasst werden für das normale Pendel
     0 -1 0;
     0 0 0;
     -1 0 0;
     0 0 0;
     1 0 0;
     0 0 0;
     0 1 0;
     0 0 0;
     0 0 1];

C = [ 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;
     0 0 0 0 0 1 0 0 0;
     0 0 0 0 0 0 0 1 0];

% calculation of the feed back matrix K and the static performance matrix V
rank(ctrb(A,B));

Q=diag([50 20 50 20 30 20 30 20 30 20]);
R=diag([3 3 3]);

[K,s,e]= lqr(A,B,Q,R);
V = inv(C*pinv(-(A-B*K))*B);
```

A.7. System inverses Pendel in Bullet

A.8. System zwei Pendel an den Enden eines Stabes in Bullet

```

% constants -----
clear;
clc;
g = 9.8;
l = 1.;

% delta limits -----
a_max = 10;

% linearisation of the system: xp = Ax+Bu; y = Cx; -----
%   alpha alphap beta betap x xp y yp z zp
A = [ 0   1   0   0   0 0 0 0 0 0;
      g/l  0   0   0   0 0 0 0 0 0;
      0   0   0   1   0 0 0 0 0 0;
      0   0   g/l  0   0 0 0 0 0 0;
      0   0   0   0   0 1 0 0 0 0;
      0   0   0   0   0 0 0 0 0 0;
      0   0   0   0   0 0 0 1 0 0;
      0   0   0   0   0 0 0 0 0 0;
      0   0   0   0   0 0 0 0 0 1;
      0   0   0   0   0 0 0 0 0 0];

%   ux uy uz
B = [ 0 0 0;
      0 -1 0;
      0 0 0;
      1 0 0;
      0 0 0;
      1 0 0;
      0 0 0;
      0 1 0;
      0 0 0;
      0 0 1];

C = [ 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 1 0];

% calculation of the feed back matrix K and the static performance matrix V
rank(ctrb(A,B));

Q=diag([1000 1 1000 1 100 10 100 10 100 10]);
R=diag([10 10 10]);

[K,s,e]= lqr(A,B,Q,R);
V = inv(C*pinv(-(A-B*K))*B);

```

A.8. System zwei Pendel an den Enden eines Stabes in Bullet

```

% constants -----
clear;
clc;
g = 9.8;
l1 = 0.5;
l2 = 0.5;
d=0.6;

% position of POS in workspace -----
x0 = 0.;
xp0 = 0.;
y0 = 0.;
yp0 = 0.;
z0 = -0.;
zp0 = 0.;

x_end = 0.;
y_end = 0.;
z_end = 0.;

% position of the pendulum in POS coordinate system -----
alpha0 = 0.;
alphap0 = 0.;
beta0 = 0.;
betap0 = 0.;

% delta limits -----
a_max = 10;

% linearisation of the system: xp = Ax+Bu; y = Cx; -----

```

A. Matlab-Skripte zur Berechnung des Riccati-Reglers

```

% alpha alphap beta betap phi phip theta thetap x xp y yp z zp ad adp bd bdp
A = [ 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      -g/l1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 -g/l1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 -g/l2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 -g/l2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;];

% xpp ypp zpp abpp bdpp
B = [ 0 0 0 0 0 0;
      0 -1 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0;
      -1 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0;
      0 -1 0 -1 0 0;
      0 0 0 0 0 0;
      -1 0 0 0 -1 0;
      0 0 0 0 0 0;
      1 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0;
      0 1 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0;
      0 0 1 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 1 0 0;
      0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 1 0;
      0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 1;];

C = [ 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;];

% calculation of the feed back matrix K and the static performance matrix V
rank(ctrb(A,B));

Q=diag([50 5 50 5 50 5 50 5 30 20 30 20 30 20 30 20]);
%Q=diag([10 1 10 1 10 1 10 1 30 20 30 20 30 20 30 20]);
R=diag([1 1 1 1]);

[K,s,e]= lqr(A,B,Q,R);
V = pinv(C*pinv(-(A-B*K))*B);

```

A.9. System Kugel auf Tablett in Bullet

```

% constants -----
clear;
clc;
g = 9.8;

% position and velocity of the tray in workspace -----
x0 = 0.;
xp0 = 0.;
y0 = 0.;
yp0 = 0.;
z0 = 0.;
zp0 = 0.;

x_end = 0.;
y_end = 0.;
z_end = 0.;

% orientation of the tray in workspace -----
alpha0 = 0.;
alphap0 = 0.;
beta0 = -0.;
betap0 = 0.;

% position and velocity of the ball on tray -----

```

A.10. System mobile Plattform mit einem Roboterarm in Bullet

```

xb0 = -0.;
xbp0 = 0.;
yb0 = -0.;
ybp0 = 0.;

x_b_end = 0.;
y_b_end = 0.;

% delta limits -----
a_max_angle = 2;
a_max_lin = 2;

% linearisation of the system: xp = Ax+Bu; y = Cx; -----
%   xb   xbp   yb   ybp   alpha  alphap  beta  betap   x   xp   y   yp   z   zp
A = [0   1   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0;
     0   0   0   0   0   0   -5/7*g  0   0   0   0   0   0   0;
     0   0   0   1   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0;
     0   0   0   0   5/7*g  0   0   0   0   0   0   0   0   0;
     0   0   0   0   0   1   0   0   0   0   0   0   0   0;
     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0;
     0   0   0   0   0   0   0   1   0   0   0   0   0   0;
     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   1   0   0   0;
     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0;
     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   1   0   0;
     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   1;
     0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0];

%   ualpha  ubeta  ux   uy   uz
B = [0   0   0   0   0;
     0   0   5/7  0   0;
     0   0   0   0   0;
     0   0   0   -5/7  0;
     0   0   0   0   0;
     1   0   0   0   0;
     0   0   0   0   0;
     0   1   0   0   0;
     0   0   0   0   0;
     0   0   1   0   0;
     0   0   0   0   0;
     0   0   0   1   0;
     0   0   0   0   0;
     0   0   0   0   1];

C = [ 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
     0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
     0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0;
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0];

% calculation of the feed back matrix K and the static performance matrix V
rank(ctrb(A,B));

Q=diag([300 10 300 10 5 1 5 1 20 15 20 15 20 15]);
R=diag([1 1 1 1]);

[K,s,e]= lqr(A,B,Q,R);
V = inv(C*pinv(-(A-B*K))*B);

```

A.10. System mobile Plattform mit einem Roboterarm in Bullet

```

% constants -----
clear;
clc;
g = 9.8;
l1 = 1.;
l2 = 1.;
M = 100;
m1 = 10;
m2 = 5;
kx = 1500;
ky = 1500;
dx = 20;
dy = 20;

% xp = Ax+Bu; y = Cx; -----
%   x           xp           y           yp           a   ap   p   pp   b   bp   t   tp

```

A. Matlab-Skripte zur Berechnung des Riccati-Reglers

```

A = [ 0          1          0          0          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      -kx/(M+m1+m2) -dx/(M+m1+m2)  0          0          0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0          0          0          1          0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0          0          -ky/(M+m1+m2) -dy/(M+m1+m2)  0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0          0          0          0          0 1 0 0 0 0 0 0 0;
      0          0          0          0          0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0          0          0          0          0 0 0 1 0 0 0 0 0;
      0          0          0          0          0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0          0          0          0          0 0 0 0 0 1 0 0 0;
      0          0          0          0          0 0 0 0 0 0 0 0 0;
      0          0          0          0          0 0 0 0 0 0 0 0 1;
      0          0          0          0          0 0 0 0 0 0 0 0 0;];

b21 = -(m1+m2)/(M+m1+m2);
b22 = -m2/(M+m1+m2);
B = [ 0 0 0 0 0;
      b21 b22 0 0;
      0 0 0 0;
      0 0 b21 b22;
      0 0 0 0;
      1 0 0 0;
      0 0 0 0;
      0 1 0 0;
      0 0 0 0;
      0 0 1 0;
      0 0 0 0;
      0 0 0 1;];

C = [0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0;
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;];

% calculation of the feed back matrix K and the static performance matrix V
rank(ctrb(A,B));

Q = diag([1 10 1 10 1 1 1 1 1 1 1]);
R = diag([1 1 1]);

[K,s,e]= lqr(A,B,Q,R);
V = inv(C*pinv(-(A-B*K))*B);

```

B. Simulink-Modelle

B.1. System zwei Pendel am Ende eines Stabes

B.2. System eine Kugel auf einem Tablett

B.3. System mobile Plattform

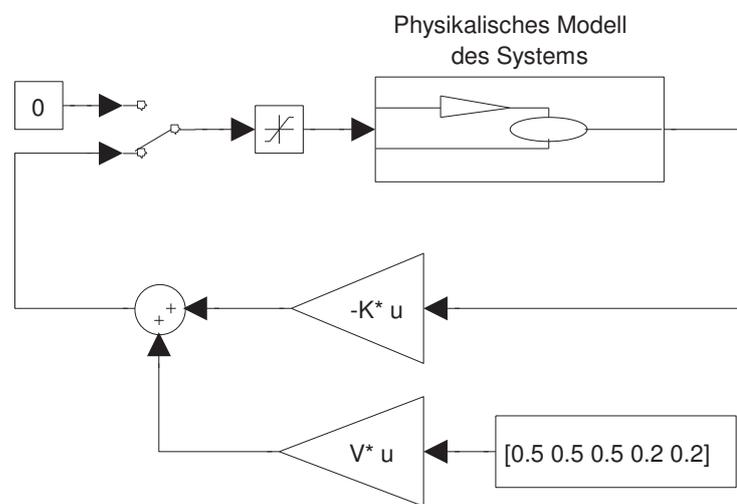


Abbildung B.1.: Abbildung des physikalischen Modells zweier Pendel am Ende eines Stabes aus Abbildung 6.1 als Simulink-Modell. Die Struktur des Modells ist die gleiche wie die des einfachen bzw. des inversen Pendels (vgl. Abbildung 4.8). Der Inhalt des Untersystems 'Physikalisches Modell' findet sich in der folgenden Abbildung.

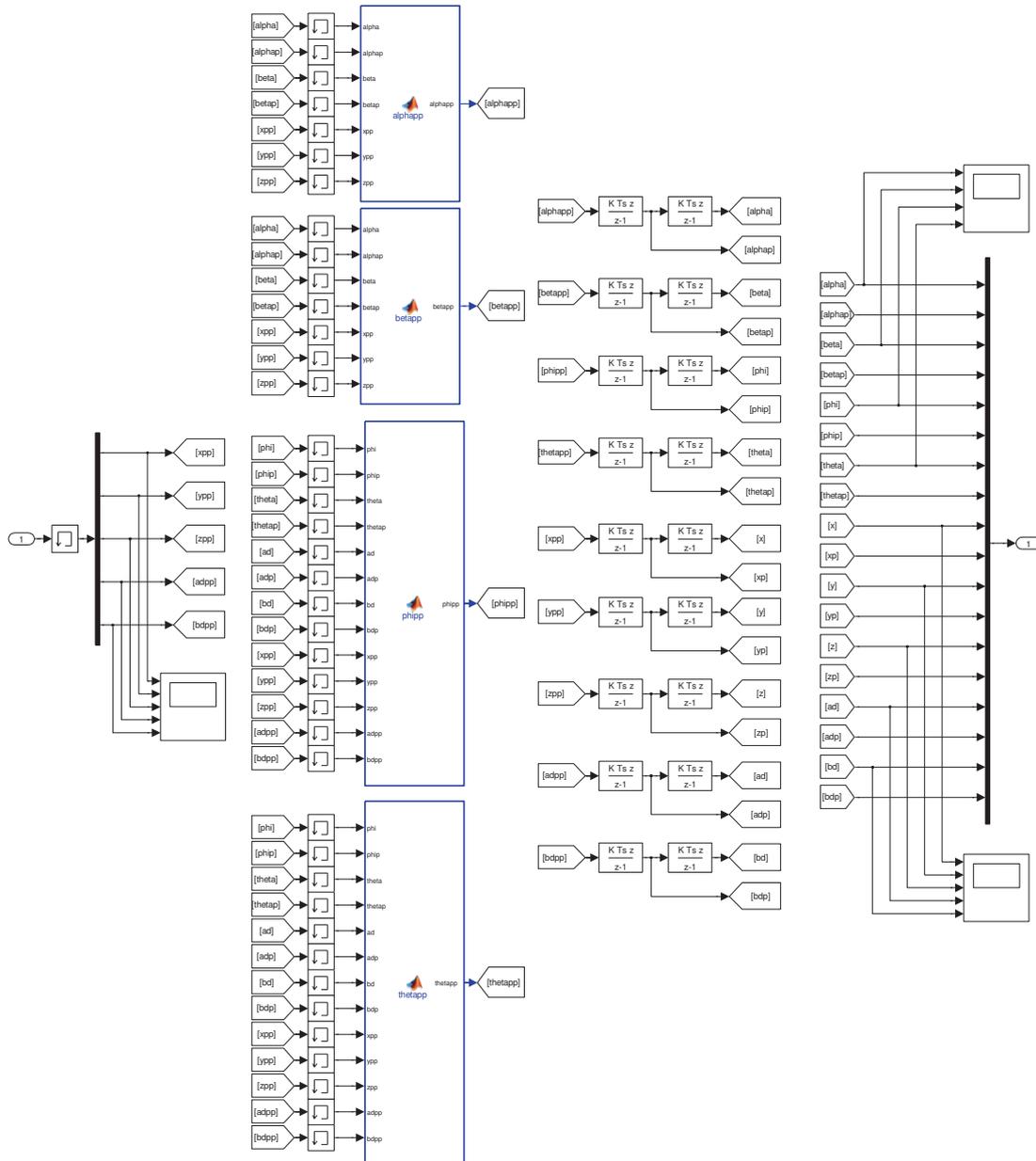
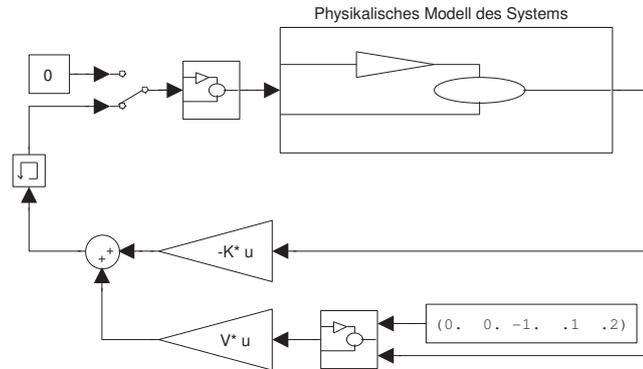


Abbildung B.2.: Der Inhalt des Systemblocks 'Physikalisches Modell' für das System zwei Pendel am Ende eines Stabes. Den Eingang des Untersystems bildet der fünfdimensionale Steuervektor \mathbf{u} . Blau eingerahmt und mit 'alphapp', 'betapp', 'phipp' und 'thetapp' beschriftet folgen von links nach rechts die Bewegungsgleichungen (4.6), (4.7), (6.6) und die (6.6) entsprechende Gleichung für $\dot{\theta}$. Der nächste mittlere Block integriert die Signale in zwei Schritten bezüglich der Zeit, so dass man auf der rechten Seite den vollständigen Zustandsvektor in der richtigen Reihenfolge stehen hat, der den Ausgang des physikalischen Modells bildet.



(a) Simulink-Modell des Systems einer Kugel auf einem Tablett

```
function y = distSat(xb_max,u1,u2)
%#codegen
const_max=xb_max;
if abs(u1-u2)>const_max
    y=u2+const_max*sign(u1);
else
    y=u1;
end
```

(b) MATLAB-Funktion zur Beschränkung des Vorfiltereingangs

Abbildung B.3.: (a) Abbildung des physikalischen Modells einer Kugel auf einem Tablett aus Abbildung 7.1 als Simulink-Modell. Die Struktur des Modells ist dem des einfachen Pendels sehr ähnlich (vgl. Abbildung 4.8). Es ist lediglich um einen Block am Eingang des Vorfilters V ergänzt. Dieser dient dazu bei Transporten auf größere Entfernungen, den vorgegebenen Sprung in der Verschiebung zu begrenzen. Der Code der entsprechenden MATLAB-Funktion ist in der unteren Teilabbildung (b) gezeigt. Der Inhalt des Untersystems 'Physikalisches Modell' findet sich anschließend in Abbildung B.4.

(b) zeigt eine MATLAB-Funktion zur Beschränkung des Vorfiltereingangs. Die hier präsentierte Funktion `distSat` kommt im Block vor dem Vorfilter fünf Mal vor für jedes Vorfiltersignal. Die Funktion hat zwei Eingänge $u1$ und $u2$. $u1$ ist dabei die fest vorgegebene Ziel- und $u2$ die aktuelle Position der Kugel auf dem Tablett bzw. die aktuelle Position des Tablett im Raum. Das dritte Argument der Funktion xb_max bzw. x_max ist ein Parameter, der im MATLAB-Skript im Anhang A.4 festgelegt wird und die Schrittweite der Vorgabe bestimmt. Die Funktion vergleicht die Zielposition mit der aktuellen und wenn die Distanz zum Ziel größer als die Schrittweite `const_max` ist, dann wird als 'neues' Zwischenziel eine $Position = aktuelle\ Position + Schrittweite \cdot Vorzeichen\ der\ Zielposition$ vorgegeben. Eine Beschreibung der Funktion erfolgt auch in Abschnitt 7.5.1.

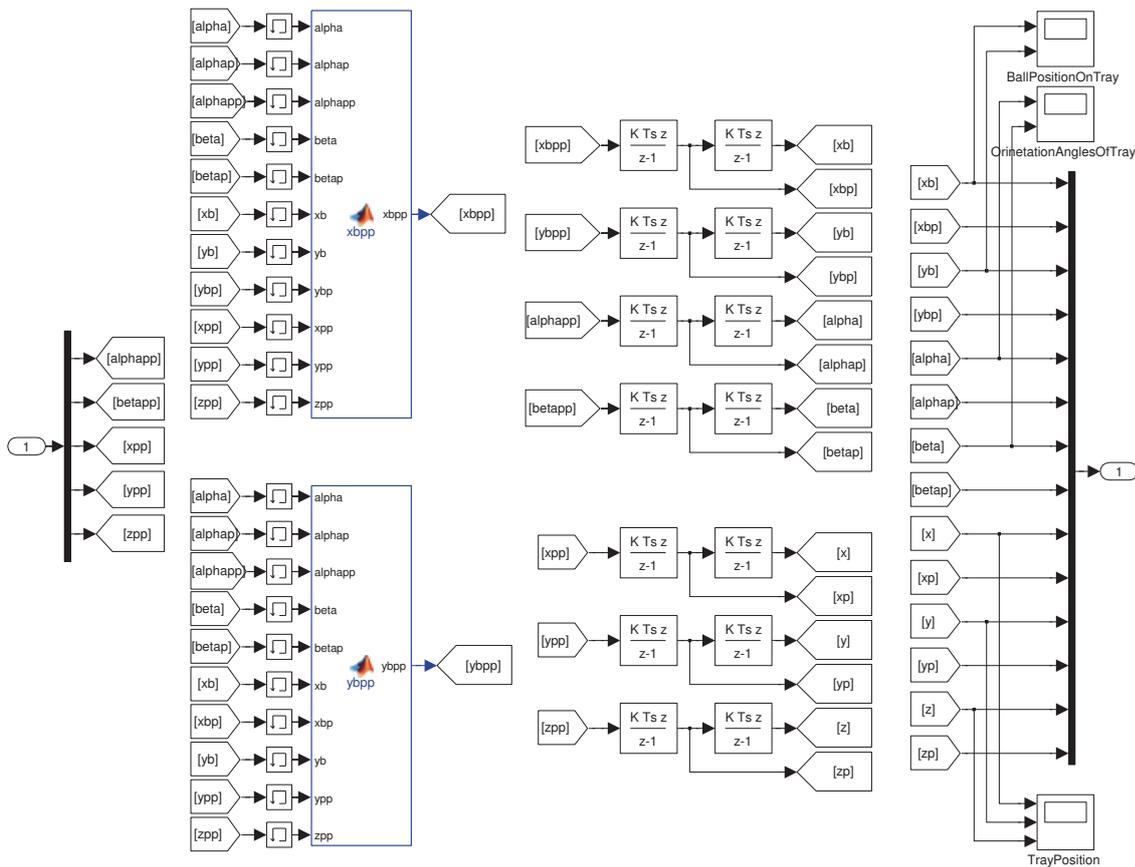


Abbildung B.4.: Der Inhalt des Systemblocks 'Physikalisches Modell' für das System eine Kugel auf einem Tablett. Den Eingang des Untersystems bildet der fünfdimensionale Steuervektor \mathbf{u} . Blau eingerahmt und mit 'xbpp' und 'ybpp' beschriftet folgen von links nach rechts die Bewegungsgleichungen (7.5) und (7.6). Der nächste mittlere Block integriert die Signale in zwei Schritten bezüglich der Zeit, so dass man auf der rechten Seite den vollständigen 14-dimensionalen Zustandsvektor in der richtigen Reihenfolge stehen hat, der den Ausgang des physikalischen Modells bildet.

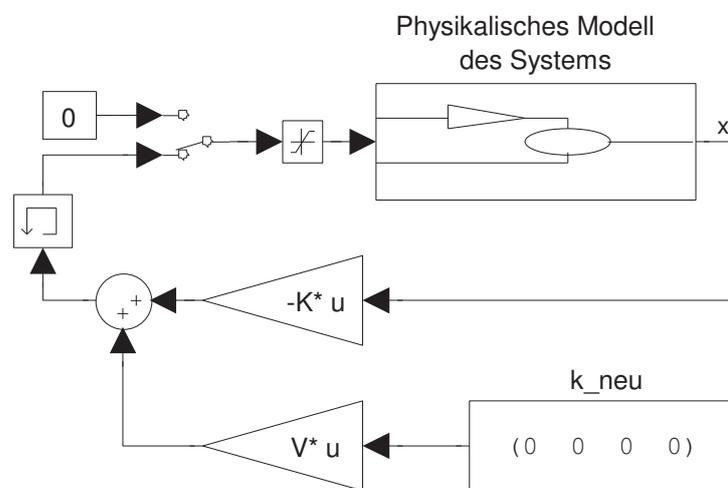


Abbildung B.5.: Abbildung des physikalischen Modells mobile Plattform aus Abbildung 9.1 als Simulink-Modell. Die Struktur des Modells ist die gleiche wie die des einfachen bzw. des inversen Pendels und des Systems zweier Pendel am Ende eines Stabes (vgl. Abbildung 4.8 und B.1). Der Inhalt des Untersystems 'Physikalisches Modell' findet sich in der folgenden Abbildung.

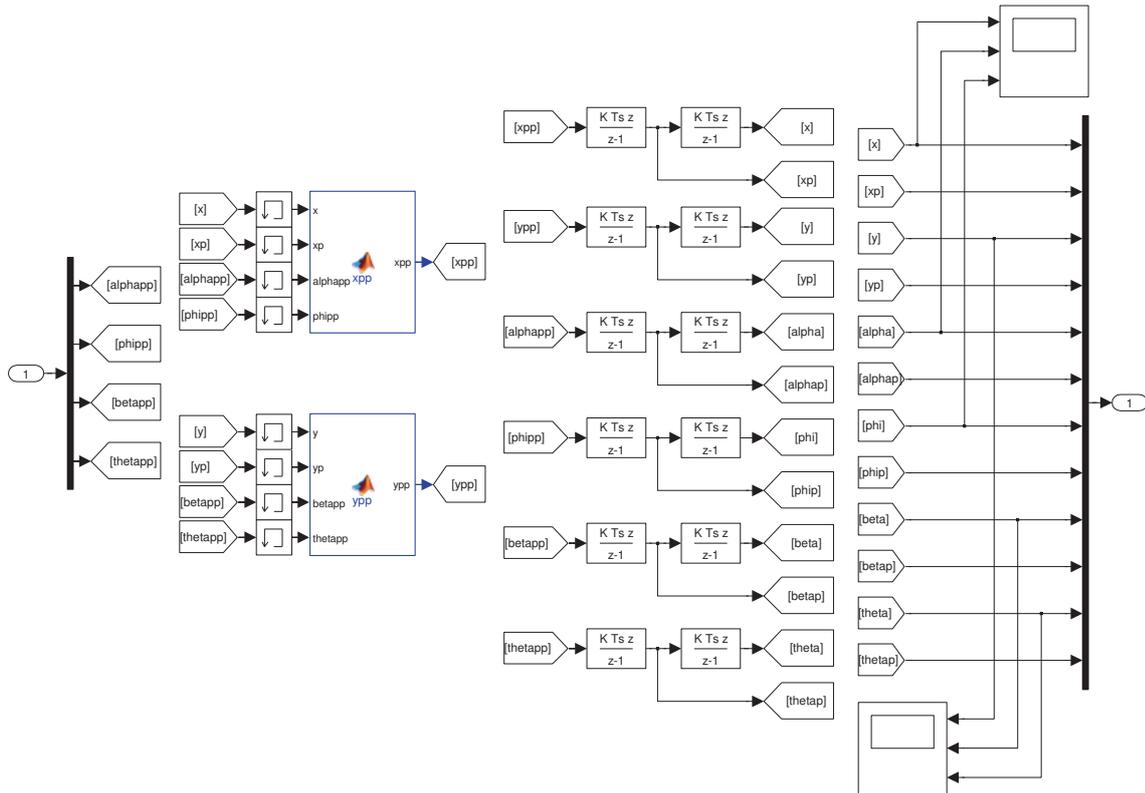


Abbildung B.6.: Der Inhalt des Systemblocks 'Physikalisches Modell' für das System mobile Plattform. Den Eingang des Untersystems bildet der vierdimensionale Steuervektor $\mathbf{u} = (\ddot{\alpha}, \ddot{\phi}, \ddot{\beta}, \ddot{\theta})^T$. Blau eingrahmt und mit 'xpp' und 'ypp' beschriftet folgen von links nach rechts die Bewegungsgleichungen (9.9) und (9.10). Der nächste mittlere Block integriert die Signale in zwei Schritten bezüglich der Zeit, so dass man auf der rechten Seite den vollständigen zwölfdimensionalen Zustandsvektor in der richtigen Reihenfolge stehen hat, der den Ausgang des physikalischen Modells bildet.

C. Abkürzungsverzeichnis

CCD	Lichtempfindlicher Kamera-Chip: C harge- c oupled D evice
DGL	D ifferenzial g leichung/en
EWK	E igenwert k onfiguration/en
IR	Infrarot(-LED)
IPO	IPO-Takt, I nter p olations-Takt
IPR	Institut für P rozessrechentechnik, Automation und R obotik
KDL	Bibliothek in OROCOS: K inematics and D ynamics L ibrary
KIT	K arlsruher I nstitut für T echnologie
KNN	K ünstliche/s N euronale/s N etz/e/s
KS	K oordinatensystem/e/s/en
lqr	MATLAB-Funktion: linear q uadratic (state-feedback) r egulator
ODE	O rdinary D ifferential E quation (gewöhnliche Differentialgleichung/en)
OpenCV	Bildbearbeitungsprogramm-bibliothek: O pen S ource C omputer V ision
OROCOS	C++-Bibliothekensammlung: O pen R obot C ontrol S oftware
RSI	R obot- S ensor- I nterface
RTT	Bibliothek von OROCOS: R eal T ime T oolkit
TCP	T ool C enter P oint
TCP/IP	T ransmission C ontrol P rotocol / I nternet P rotocol
UDP	U ser D atagram P rotocol
XML	E xtensible M arkup L anguage

Abbildungsverzeichnis

2.1. Aufbau der Arbeit	8
4.1. Physikalisches Modell - Pendel mit beweglichem Aufhängepunkt	24
4.2. EWK des Systems Pendel	29
4.3. Zustandsregler des Systems Pendel	30
4.4. Experimenteller Aufbau: Roboter mit Pendel	33
4.5. Experimenteller Aufbau: optischer Sensor für Pendelexperiment	34
4.6. Skizze des gesamten Versuchsaufbaus	36
4.7. Interne Softwarestruktur des Echtzeitreglers mit OROCOS	36
4.8. Simulink-Modell des Systems Pendel	38
4.9. Ergebnisse einer Simulink-Simulation, Teil 1: (a) freie Schwingung, (b) Schwingungsunterdrückung	39
4.10. Ergebnisse einer Simulink-Simulation, Teil 2: Transport mit Schwingungsunterdrückung	40
4.11. Pendel als Bullet-Simulation: (a) graphische Darstellung, (b) Simulink-Regler, (c) Datenaustausch zw. Regler und Bullet-Simulation	43
4.12. Ergebnisse einer Bullet-Simulation: (a) freie Schwingung, (b) Schwingungsunterdrückung	44
4.13. Ergebnisse eines realen Experiments: (a) freie Schwingung, (b) Schwingungsunterdrückung	46
4.14. Vergleich der Ergebnisse: Bullet-Simulation ↔ Experiment	47
5.1. EWK des Systems inverses Pendel	53
5.2. Ergebnisse einer Simulink-Simulation: (a) Ausgleich einer Anfangsabweichung, (b) Transport mit Anfangsabweichung	55
5.3. Ergebnisse einer Bullet-Simulation: Transport eines inv. Pendels	56
6.1. Physikalisches Modell - zwei Pendel an den Enden eines Stabes	61
6.2. EWK des Systems zweier Pendel an Enden eines Stabes	63
6.3. Ergebnisse einer Simulink-Simulation, Teil 1: (a) frei Schwingungen, (b) Schwingungsunterdrückung	64
6.4. Ergebnisse einer Simulink-Simulation, Teil 2: Transport mit Schwingungsunterdrückung	65
6.5. Zwei Pendel als Bullet-Simulation: graphische Darstellung	67
6.6. Ergebnisse einer Bullet-Simulation: Transport zweier Pendel	67

7.1.	Physikalisches Modell - Kugel auf einem Tablett	71
7.2.	EWK des Systems einer Kugel auf einem Tablett	73
7.3.	Experimenteller Aufbau: Roboter mit Tablettkonstruktion	75
7.4.	Zwei Strategien zur Positionsbestimmung der Kugel auf dem Tablett	75
7.5.	Ergebnisse einer Simulink-Simulation, Teil 1: Ausgleich einer Anfangsabweichung	77
7.6.	Ergebnisse einer Simulink-Simulation, Teil 2: Überlagerung aus Transport und Platzierungsvorgang	78
7.7.	Ergebnisse einer Simulink-Simulation, Teil 3: Einfluss von Q	79
7.8.	Kugel auf Tablett als Bullet-Simulation: graphische Darstellung	80
7.9.	Vergleich der Ergebnisse: Bullet-Simu \leftrightarrow Experiment	81
8.1.	Experimenteller Aufbau für den Transport von Flüssigkeiten: (a) Pendeltablett, (b) Pendelkonstruktion mit Becher	84
8.2.	Bullet-Simulation eines Pendeltablett: graphische Darstellung	85
8.3.	Ergebnisse einer Bullet-Simulation: Transport eines Pendeltablett	86
8.4.	Bullet-Simulation einer Tablettcontainers: graphische Darstellung	88
8.5.	Ergebnisse einer Bullet-Simulation, Teil 1: Kugel als Sensor	90
8.6.	Ergebnisse einer Bullet-Simulation, Teil 2: mit Winkelanpassung	91
8.7.	Ergebnisse einer Bullet-Simulation, Teil 3: ohne Kugeltracking und ohne Winkelanpassung	92
9.1.	Physikalisches Modell - schwingungsfähige mobile Plattform	96
9.2.	EWK des Systems mobile Plattform	102
9.3.	Ergebnisse einer Simulink-Simulation, Teil 1: freie gedämpfte Schwingungen	103
9.4.	Ergebnisse einer Simulink-Simulation, Teil 2: Ausgleich einer Anfangsauslenkung	104
9.5.	Ergebnisse einer Simulink-Simulation, Teil 3: Ausgleich einer Anfangsauslenkung mit Vorpositionierung	105
9.6.	Bullet-Simulation einer mobilen Plattform: graphische Darstellung	107
9.7.	Ergebnisse einer Bullet-Simulation: Verfahren einer mobilen Plattform	107
9.8.	Einsatzszenarien auf einer mobilen Plattform: (a) Pendelstabilisierung, (b) Stabilisierung einer Kugel auf einem Tablett	109
B.1.	Simulink-Modell des Systems zweier Pendel am Ende eines Stabes	126
B.2.	Untersystem 'Physikalisches Modell' des Modells zweier Pendel	127
B.3.	Simulink-Modell des Systems einer Kugel auf einem Tablett	128
B.4.	Untersystem 'Physikalisches Modell' des Modells Kugel auf Tablett	129
B.5.	Simulink-Modell des Systems mobile Plattform	130
B.6.	Untersystem 'Physikalisches Modell' des Modells mobile Plattform	131

Literatur

- [1] P.K.W. Abeygunawardhana, M. Defoort und T. Murakami. „Self-sustaining control of two-wheel mobile manipulator using sliding mode control“. In: *Advanced Motion Control, 2010 11th IEEE International Workshop on*. 2010, S. 792–797.
- [2] P.K.W. Abeygunawardhana und T. Murakami. „Vibration Suppression of Two-Wheel Mobile Manipulator Using Resonance-Ratio-Control-Based Null-Space Control“. In: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 57.12 (2010), S. 4137–4146.
- [3] P.K.W. Abeygunawardhana und M. Toshiyuki. „Environmental interaction of two wheeled mobile manipulator by using reaction torque observer“. In: *Advanced Motion Control, 2008. AMC '08. 10th IEEE International Workshop on*. 2008, S. 348–353.
- [4] Mahdiah Adeli, Seyedeh Hamideh Zarabadi, Hassan Zarabadipour und Mahdi Aliyari Shoorehdeli. „Design of a parallel distributed fuzzy LQR controller for double-pendulum-type overhead cranes“. In: *Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 2011 IEEE International Conference on*. 2011, S. 62–67.
- [5] M. Agostini, G.G. Parker, K. Groom, H. Schaub und R.D. Robinett. „Command shaping and closed-loop control interactions for a ship crane“. In: *American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002*. Bd. 3. 2002, 2298–2304 vol.3.
- [6] M.J. Agostini, G.G. Parker, E.E. Kruse, H. Schaub, K. Groom und R.D. Robinett. „Multiple axis boom crane maneuver generation for payload swing suppression“. In: *American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001*. Bd. 1. 2001, 287–292 vol.1.
- [7] A. A. Al-mousa, A. H. Nayfeh und Pushkin Kachroo. „Control of rotary cranes using fuzzy logic“. In: *Shock and Vibration* Volume 10, Number 2/2003 (2003), S. 81–95.
- [8] W. Aribowo, T. Yamashita, K. Terashima und H. Kitagawa. „Input shaping control to suppress sloshing on liquid container transfer using multi-joint robot arm“. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*. 2010, S. 3489–3494.

- [9] K. J. Astroem und K. Furuta. „Swinging up a Pendulum by Energy Control“. In: *IFAC 13th World Congress*. San Francisco, California, 1996.
- [10] J.W. Auernig und H. Troger. „Time optimal control of overhead cranes with hoisting of the load“. In: *Automatica* 23.4 (1987), S. 437 –447. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109887900732>.
- [11] Wilhelm August, Jian Ren, Simon Notheis, Thomas Haase, Bjoern Hein und Heinz Woern. „3D Pendulum Swinging Control by an Industrial Robot Manipulator“. In: *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)* (Juni 2010), S. 1 –7.
- [12] Wilhelm August und Heinz Woern. „Stabilization of Moved Objects for Tele-Operated Robots“. In: *IEEE-CYBER 2012*. Mai 2012.
- [13] S. Awtar, C. Bernard, N. Boklund, A. Master, D. Ueda und K. Graig. „Mechatronic Design of a Ball-on-Plate Balancing System“. In: *12* (2002), S. 217–228.
- [14] B. Bandyopadhyay, P.S. Gandhi und S. Kurode. „Sliding Mode Observer Based Sliding Mode Controller for Sloss-Free Motion Through PID Scheme“. In: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 56.9 (Sep. 2009), S. 3432 –3442.
- [15] N. Bolotnik, I. Zeidis, K. Zimmermann und S. Yatsun. „Vibration Driven Robots“. In: (2011).
- [16] BulletPhysics. Mai 2012. URL: bulletphysics.org.
- [17] Lingzhi Cao und Lei Liu. „Adaptive Fuzzy Sliding Mode Method-Based Position and Anti-swing Control for Overhead Cranes“. In: *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on*. Bd. 1. Jan. 2011, S. 335 –338.
- [18] N. Chang, N. Chang, T. Chang und E. Hou. „High speed position control of a swinging load“. In: *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*. Juli 2010, S. 190 –195.
- [19] Swei Jen Chen, B. Hein und H. Worn. „Swing attenuation of suspended objects transported by robot manipulator using acceleration compensation“. In: *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*. Nov. 2007, S. 2919 –2924.
- [20] Swei Jen Chen, B. Hein und H. Worn. „Using Acceleration Compensation to Reduce Liquid Surface Oscillation During a High Speed Transfer“. In: *Proc. IEEE Int Robotics and Automation Conf.* 2007, S. 2951–2956.
- [21] Swei Jen Chen, H. Worn, U. E. Zimmermann und R. Bischoff. „Gentle robotic handling - adaptation of gripperorientation to minimize undesired shear forces“. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation ICRA 2006*. 2006, S. 309–314.

-
- [22] Sung-Kun Cho und Ho-Hoon Lee. „An anti-swing control of a 3-dimensional overhead crane“. In: *American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000*. Bd. 2. 2000, 1037–1041 vol.2.
- [23] Semaphore Class. Mai 2012. URL: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/system.threading.semaphore.aspx>.
- [24] A. X. H. Dang und I. Ebert-Uphoff. „Active acceleration compensation for transport vehicles carrying delicate objects“. In: 20.5 (2004), S. 830–839.
- [25] M. W. Decker, A. X. Dang und I. Ebert-Uphoff. „Motion planning for active acceleration compensation“. In: *Proc. ICRA Robotics and Automation IEEE Int. Conf.* Bd. 2. 2001, S. 1257–1264.
- [26] Huida Duan, Yantao Tian und Guangbin Wang. „Trajectory tracking controller design of high-order ball and plate system based on improved auto-disturbance rejection controller“. In: *Systems and Control in Aeronautics and Astronautics (ISSCAA), 2010 3rd International Symposium on*. Juni 2010, S. 80–85.
- [27] DudenOnline. Mai 2012. URL: <http://www.duden.de>.
- [28] Wolfgang Eiden. *Praezise Unschaerfe. Informationsmodellierung durch Fuzzy-Mengen*. Ibidem Verlag; Auflage: 1, Dez. 2002.
- [29] M. Fischer, M. Schraufstetter, C. Richter, F. Irlinger und T.C. Lueth. „Tremor compensation by use of a mechatronic cup holder“. In: *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), 2010 4th International Conference on*. März 2010, S. 1–8.
- [30] Otto Foellinger. *Nichtlineare Regelungen II*. R. Oldenbourg Verlag, 1993.
- [31] Otto Foellinger. *Regelungstechnik*. Huethig Buch Verlag, Heidelberg, 1994.
- [32] R. Graf und R. Dillmann. „Active acceleration compensation using a Stewart-platform on a mobile robot“. In: *eurobot*. Published by the IEEE Computer Society. 1997, S. 59.
- [33] R. Graf und R. Dillmann. „Aktive Beschleunigungskompensation mittels einer Stewart-Plattform auf einem mobilen Roboter“. In: *Autonome Mobile Systeme-AMS 97* (1997).
- [34] R. Graf und R. Dillmann. „Acceleration compensation using a Stewart platform on a mobile robot“. In: *Advanced Mobile Robots, 1999. (Eurobot '99) 1999 Third European Workshop on*. 1999, S. 17–24.
- [35] Knut Graichen, Michael Treuer und Michael Zeitz. „Swing-up of the double pendulum on a cart by feedforward and feedback control with experimental validation“. In: *Automatica* 43.1 (2007), S. 63–71. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109806003050>.

- [36] M. Grundelius. „Iterative optimal control of liquid slosh in an industrial packaging machine“. In: *Decision and Control, 2000. Proceedings of the 39th IEEE Conference on*. Bd. 4. 2000, 3427–3432 vol.4.
- [37] M. Grundelius und B. Bernhardsson. „Constrained iterative learning control of liquid slosh in an industrial packaging machine“. In: *Decision and Control, 2000. Proceedings of the 39th IEEE Conference on*. Bd. 5. 2000, 4544–4549 vol.5.
- [38] J. Huang. „Modellierung, Simulation und Entwurf biomimetischer Roboter basierend auf apedaler undulatorischer Lokomotion“. In: ISLE. 2003.
- [39] J.R. Huey und W. Singhose. „Design of proportional-derivative feedback and input shaping for control of inertia plants“. In: *Control Theory Applications, IET* 6.3 (2012), S. 357–364.
- [40] F. Inoue, T. Muralami und K. Ihnishi. „A motion control of mobile manipulator with external force“. In: *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* 6.2 (Juni 2001), S. 137–142.
- [41] S.F. Jatsun, K. Zimmerman, I. Zeidis und AS Jatsun. „Vibration driven robots for in pipe inspection“. In: *Mechatronics, ICM2007 4th IEEE International Conference on*. IEEE. 2007, S. 1–5.
- [42] KUKA. *KUKA.Ethernet RSI XML 1.1*. Techn. Ber. KUKA Robot Group, 2008.
- [43] KUKA. *Die Bewegungskuenstler in der niedrigen Traglastklasse*. Techn. Ber. 2010. URL: www.kuka-robotics.com.
- [44] M. Kaneko, Y. Sugimoto, K. Yano und K. Terashima. „Supervisory control of pouring process by tilting-type automatic pouring robot“. In: *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*. Bd. 3. Okt. 2003, 3004–3009 vol.3.
- [45] Sungchul Kang, Kiyoshi Komoriya, Kazuhito Yokoi, Tetsuo Koutoku, Byungchan Kim und Shinsuk Park. „Control of impulsive contact force between mobile manipulator and environment using effective mass and damping controls“. In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 11 (5 2010). 10.1007/s12541-010-0082-4, S. 697–704. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-010-0082-4>.
- [46] Dong Hyun Kim und Jae Weon Choi. „Attitude controller design for a launch vehicle with fuel-slosh“. In: *SICE 2000. Proceedings of the 39th SICE Annual Conference. International Session Papers*. 2000, S. 235–240.
- [47] H. Kojima und T. Kibe. „Optimal trajectory planning of a two-link flexible robot arm based on genetic algorithm for residual vibration reduction“. In: *Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on*. Bd. 4. 2001, 2276–2281 vol.4.

-
- [48] M. H. Korayem, A. Nikoobin und V. Azimirad. „Trajectory optimization of flexible link manipulators in point-to-point motion“. In: *Robotica* 27.06 (2009), S. 825–840. URL: <http://dx.doi.org/10.1017/S0263574708005183>.
- [49] David Kriesel. *Ein kleiner Ueberblick ueber Neuronale Netze*. David Kriesel, 2005.
- [50] S. Kurode, B. Bandyopadhyay und P.S. Gandhi. „Robust control for slosh-free motion using sliding modes“. In: *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Nov. 2010, S. 2408–2413.
- [51] Friedhelm Kuypers. *Klassische Mechanik*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003.
- [52] Kwang-Kyu Lee, G. Batz und D. Wollherr. „Basketball robot: Ball-On-Plate with pure haptic information“. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation ICRA 2008*. 2008, S. 2410–2415.
- [53] J.Y. Lew und A. Khalil. „Anti-swing control of a suspended load with a robotic crane“. In: *American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000*. Bd. 2. 2000, 1042–1046 vol.2.
- [54] D. Lewis, G.G. Parker, B. Driessen und R.D. Robinett. „Command shaping control of an operator-in-the-loop boom crane“. In: *American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998*. Bd. 5. Juni 1998, 2643–2647 vol.5.
- [55] Hongwei Liu und Yanyang Liang. „Trajectory tracking sliding mode control of ball and plate system“. In: *Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR), 2010 2nd International Asia Conference on*. Bd. 3. März 2010, S. 142–145.
- [56] MATLAB. Mai 2012. URL: <http://www.mathworks.com>.
- [57] MATLAB/Simulink. Mai 2012. URL: <http://www.mathworks.com>.
- [58] Shared Memory. Mai 2012. URL: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa366551%28VS.85%29.aspx>.
- [59] M. Moarref, M. Saadat und G. Vossoughi. „Mechatronic design and position control of a novel ball and plate system“. In: *Control and Automation, 2008 16th Mediterranean Conference on*. Juni 2008, S. 1071–1076.
- [60] N. Mohajerin, M.B. Menhaj und A. Doustmohammadi. „A Reinforcement Learning Fuzzy Controller for the Ball and Plate system“. In: *Fuzzy Systems (FUZZ), 2010 IEEE International Conference on*. Juli 2010, S. 1–8.
- [61] Marco A. Moreno-Armendariz, Cesar A. Perez-Olvera, Floriberto Ortiz Rodriguez und Elsa Rubio. „Indirect hierarchical FCMAC control for the ball and plate system“. In: *Neurocomputing* 73.13 (2010), S. 2454–2463. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231210002298>.

- [62] Mark W. Noakes und John F. Jansen. „Generalized inputs for damped-vibration control of suspended payloads“. In: *Robotics and Autonomous Systems* 10 (1992), S. 199–205. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092188909290026U>.
- [63] Y. Noda, K. Yano und K. Terashima. „Tracking control with sloshing-suppression of self-transfer ladle to continuous-type mold line in automatic pouring system“. In: *SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*. Bd. 2. Aug. 2002, 1206–1209 vol.2.
- [64] S. Notheis, W. August, B. Hein und H. Wörn. „AR-based Approach for Evaluation of new Model-based Control Algorithms“. In: *ROBOTIK 2012* (2012).
- [65] OROCOS. Mai 2012. URL: www.orocos.org.
- [66] OpenCV. Mai 2012. URL: opencv.willowgarage.com/wiki/.
- [67] PGFPlot. Mai 2012. URL: <http://www.iro.umontreal.ca/~simardr/pgfplots.pdf>.
- [68] Bae-Jeong Park, Keum-Shik Hong und Chang-Do Huh. „Time-efficient input shaping control of container crane systems“. In: *Control Applications, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on*. 2000, S. 80–85.
- [69] Hyung-Soon Park, P.H. Chang und Jong-Sung Hur. „Time-varying input shaping technique applied to vibration reduction of an industrial robot“. In: *Intelligent Robots and Systems, 1999. IROS '99. Proceedings. 1999 IEEE/RSJ International Conference on*. Bd. 1. 1999, 285–290 vol.1.
- [70] G. Parker, M. Graziano, F. Leban, J. Green und J.D. Bird. „Reducing Crane Payload Swing Using A Rider Block Tagline Control System“. In: *OCEANS 2007 - Europe*. Juni 2007, S. 1–5.
- [71] B. Pridgen, Kun Bai und W. Singhose. „Slosh suppression by robust input shaping“. In: *Decision and Control (CDC), 2010 49th IEEE Conference on*. Dez. 2010, S. 2316–2321.
- [72] M. Reyhanoglu und J.R. Hervas. „Nonlinear control of space vehicles with multi-mass fuel slosh dynamics“. In: *Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2011 5th International Conference on*. Juni 2011, S. 247–252.
- [73] Albert Lloyd Ryall. *Handling, Transportation and Storage of Fruits and Vegetables: 002*. ISBN-10: 0870554107. Avi Publishing Co Inc., U.S. Auflage: 2 Sub, Aug. 1982.
- [74] Kwanghyun Ryu und Yonghwan Oh. „Balance control of ball-beam system using redundant manipulator“. In: *Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on*. Apr. 2011, S. 403–408.

-
- [75] Y. Sakawa und A. Nakazumi. „Modeling and Control of a Rotary Crane“. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 107.3 (1985), S. 200–206. URL: <http://link.aip.org/link/?JDS/107/200/1>.
- [76] Y. Sakawa und Y. Shindo. „Optimal control of container cranes“. In: *Automatica* 18.3 (1982), S. 257–266. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109882900863>.
- [77] Kiminori Sato und Yoshiyuki Sakawa. „Modelling and control of a flexible rotary crane“. In: *International Journal of Control* 48.5 (1988), S. 2085–2105. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207178808906308>.
- [78] A.S. Shiriaev, H. Ludvigsen und O. Egeland. „Swinging up the spherical pendulum via stabilization of its first integrals“. In: *Automatica* 40.1 (2004), S. 73–85. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109803002619>.
- [79] W.E. Singhose, W.P. Seering und N.C. Singer. „Shaping inputs to reduce vibration: a vector diagram approach“. In: *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*. Mai 1990, 922–927 vol.2.
- [80] William Singhose. „Command shaping for flexible systems: A review of the first 50 years“. In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 10 (4 2009), S. 153–168. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-009-0084-2>.
- [81] O.J.M. Smith. „Posicast Control of Damped Oscillatory Systems“. In: *Proceedings of the IRE* 45.9 (Juni 1957), S. 1249–1255.
- [82] R. Smith, G. Starr, R. Lumia und J. Wood. „Preshaped trajectories for residual vibration suppression in payloads suspended from multiple robot manipulators“. In: *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*. Bd. 2. Mai 2004, 1599–1603 Vol.2.
- [83] G. P. Starr. „Swing-free transport of suspended objects with a robot manipulator“. In: *Decision and Control, 1983. The 22nd IEEE Conference on*. Bd. 22. Dez. 1983, S. 1484–1487.
- [84] G.P. Starr. „Swing-Free Transport of Suspended Objects with a Path-Controlled Robot Manipulator“. In: *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 107 (März 1985).
- [85] SumatraPDF. Mai 2012. URL: <http://blog.kowalczyk.info/software/sumtrapdf/free-pdf-reader-de.html>.
- [86] J. Suthakorn und G. G. Parker. „Anti-Swing Control of Suspended Loads on Shipboard Robotic Cranes“. In: *Proc. the 8th World Multi-Conf. on Systemics, Cybernetics, and Informatics (SCI 2004)*. Florida, USA, Juli 2004.

- [87] Y. Suzuki, S.-I. Yamada und H. Fujikawa. „Anti-swing control of the container crane by fuzzy control“. In: *Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993. Proceedings of the IECON '93., International Conference on*. Nov. 1993, 230 –235 vol.1.
- [88] K. Terashima, M. Hamaguchi und K. Yamaura. „Modeling and input shaping control of liquid vibration for an automatic pouring system“. In: *Decision and Control, 1996., Proceedings of the 35th IEEE*. Bd. 4. Dez. 1996, 4844 –4850 vol.4.
- [89] M.P. Tzamtzi, F.N. Koumboulis und N.D. Kouvakas. „A two stage robot control for liquid transfer“. In: *Emerging Technologies and Factory Automation, 2007. ETFA. IEEE Conference on*. Juli 2007, S. 1324 –1333.
- [90] M.P. Tzamtzi, F.N. Koumboulis, N.D. Kouvakas und G.E. Panagiotakis. „A Simulated Annealing Controller for Sloshing Suppression in Liquid Transfer with Delayed Resonators“. In: *Control and Automation, 2006. MED '06. 14th Mediterranean Conference on*. Juli 2006, S. 1 –8.
- [91] R. Venugopal und D.S. Bernstein. „State space modeling and active control of slosh“. In: *Control Applications, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on*. Sep. 1996, S. 1072 –1077.
- [92] Hongrui Wang, Yantao Tian, Ce Ding, Qing Gu und Feng Guo. „Output regulation of the ball and plate system with a nonlinear velocity observer“. In: *Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on*. Juni 2008, S. 2164 –2169.
- [93] Hongrui Wang, Yantao Tian, Siyan Fu und Zhen Sui. „Nonlinear control for output regulation of ball and plate system“. In: *Control Conference, 2008. CCC 2008. 27th Chinese*. Juli 2008, S. 382 –387.
- [94] Hongrui Wang, Yantao Tian, Zhen Sui, Xuefei Zhang und Ce Ding. „Tracking Control of Ball and Plate System with a Double Feedback Loop Structure“. In: *Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007. International Conference on*. Aug. 2007, S. 1114 –1119.
- [95] E. van West, A. Yamamoto und T. Higuchi. „Manipulation of Thin Objects Using Levitation Techniques, Tilt Control, and Haptics“. In: *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on* 7.3 (Juli 2010), S. 451 –462.
- [96] Hao Wu, Fuchun Sun, Zengqi Sun und Licheng Wu. „Optimal Trajectory Planning of a Flexible Dual-Arm Space Robot with Vibration Reduction“. In: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 40 (2 2004). 10.1023/B:JINT.0000038946.21921.c7, S. 147–163. URL: <http://dx.doi.org/10.1023/B:JINT.0000038946.21921.c7>.

-
- [97] Weimin Xu, Wei Gu, Aidi Shen, Janxin Chu und Wangqiang Niu. „Anti-swing control of a new container crane with fuzzy uncertainties compensation“. In: *Fuzzy Systems (FUZZ), 2011 IEEE International Conference on*. Juni 2011, S. 1648–1655.
- [98] N. Yanai, M. Yamamoto und A. Mohri. „Feed-back control of crane based on inverse dynamics calculation“. In: *Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on*. Bd. 1. 2001, 482–487 vol.1.
- [99] TW Yang, WJ O’Connor und F. Ramos. „Wave-based slewing and vibration control of a flexible arm“. In: *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications* 7.2 (2009), S. 157–170.
- [100] K. Yano, M. Kaneko, Y. Noda und K. Terashima. „Adaptive feedforward control of automatic pouring robot considering influence of the accumulating disturbance“. In: *Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2006 IEEE*. Okt. 2006, S. 2820–2825.
- [101] K. Yano, T. Toda und K. Terashima. „Sloshing suppression control of automatic pouring robot by hybrid shape approach“. In: *Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on*. Bd. 2. 2001, 1328–1333 vol.2.
- [102] Ken’ichi Yano, Shimpei Higashikawa und Kazuhiko Terashima. „Motion control of liquid container considering an inclined transfer path“. In: *Control Engineering Practice* 10.4 (2002). Mechatronics, S. 465–472. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066101001071>.
- [103] H. Yavuz, S. Mistikoglu und S. Kapucu. „Hybrid input shaping to suppress residual vibration of flexible systems“. In: *Journal of Vibration and Control* 18.1 (2012), S. 132–140.
- [104] Wen Yu und Xiaoou Li. „Anti-swing control for an overhead crane with intelligent compensation“. In: *Resilient Control Systems (ISRCS), 2010 3rd International Symposium on*. Aug. 2010, S. 85–90.
- [105] Xiaowen Yu, Jing Xu, Shaoli Liu und Ken Chen. „A control system of a ping-pong robot arm based on fuzzy method“. In: *Mechatronics and Automation (ICMA), 2011 International Conference on*. Aug. 2011, S. 398–403.
- [106] D. Zamoski, G. Starr, J. Wood und R. Lumia. „Swing-free trajectory generation for dual cooperative manipulators using dynamic programming“. In: *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*. Mai 2006, S. 1997–2003.
- [107] Fei Zheng, Xiaoli Li, Shangjun Wang und Dawei Ding. „Position control of ball and plate system based on switching mechanism“. In: *Automation and Logistics (ICAL), 2011 IEEE International Conference on*. Aug. 2011, S. 233–237.

-
- [108] A. Zia. „Polar and polygon path traversal of a ball and plate system“. In: *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on*. Juli 2011, S. 4005 –4009.
- [109] H. J. Zimmermann. *Fuzzy Set Theory and its Applications*. Springer; 4th edition, 1985.
- [110] K. Zimmermann, V. Bohm und I. Zeidis. „Vibration-driven mobile robots based on magneto-sensitive elastomers“. In: *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on*. Juli 2011, S. 730 – 735.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Vorname: Wilhelm
Name: August
Geburtsdatum: 03.06.1980
Geburtsort: Gurjew, Kasachstan
Familienstand: ledig

Ausbildung

1986-1994 Mittlere Schule in Gurjew
1995-2001 Gymnasium Fränkische Schweiz in Ebermannstadt
2002-2007 Universität Bayreuth,
Studiengang Physik Diplom
2008-2012 Karlsruher Institut für Technologie KIT,
Institut für Prozessrechentechnik, Automation
und Robotik IPR,
Promotion

Berufstätigkeit

2001-2002 Fernmelderegiment 220 in Donauwörth,
Grundwehrdienst in der Bundeswehr
2008-2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPR des KIT
seit Mai 2012 Systementwickler bei ITK-Engineering AG in
Herxheim