

# Vergleichende Untersuchung zum Einfluss der Morphologie auf das Verhalten von Robotern unter Verwendung von CSL

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplominformatiker(in)

**Humboldt-Universität zu Berlin**  
**Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II**  
**Institut für Informatik**

eingereicht von: Tanja Richter  
geboren am: 28. Januar 1980  
in: Salzgitter

Gutachter(innen): Prof. Dr. Hans-Dieter Burkhard  
Prof. Dr. Holger Schlingloff

eingereicht am: 20. September 2013

# Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss der Morphologie auf das Verhalten von Robotern untersucht. Grundlage für die Untersuchungen sind Videosequenzen von verschiedenen Robotern, die sich hinsichtlich ihrer Funktionalität und Morphologie unterscheiden und variierenden Umwelteinflüssen ausgesetzt sind. Für die Untersuchungen wird zunächst das Verhalten der Roboter ohne zusätzliche Umwelteinflüsse analysiert, wobei die Ansteuerung der Gelenke der Roboter mittels CSL im Contraction Mode erfolgt. Dabei stehen die morphologischen Aspekte wie die Anzahl der Segmente und Gelenke, die Form und Positionierung der einzelnen Segmente sowie die Lage und Verschiebung der Massenmittelpunkte im Vordergrund. An Hand der Videosequenzen erfolgt eine weiterführende Verhaltensanalyse der Roboter hinsichtlich ihrer Verhaltensänderung bei Einwirkung zusätzlicher Umwelteinflüsse. Die Ergebnisse der bisherigen Analysen werden verwendet, um eine theoretische Betrachtung zum Einfluss der Morphologieänderungen auf das Verhalten durchzuführen. Dazu wird die Morphologie jedes Roboters variiert und die Auswirkungen auf das Verhalten analysiert. Abschließend erfolgt eine Beurteilung der einzelnen Morphologievarianten hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile und ihrer Eignung in einer Umwelt bestimmte Zielstellungen zu erreichen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ziel der Arbeit . . . . .	2
1.2	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Arbeit</b>	<b>5</b>
2.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	5
2.2	Cognitive Sensorimotor Loop - CSL . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Objekt mit einem Freiheitsgrad: Wippe</b>	<b>11</b>
3.1	Objektbeschreibung . . . . .	11
3.2	Vorbetrachtung . . . . .	11
3.3	Bewegungsanalyse der Wippe im waagerechten Stand . . . . .	12
3.4	Bewegungsanalyse der Wippe im gekippten Stand . . . . .	16
3.5	Zusammenfassung . . . . .	18
3.6	Betrachtung der Morphologie . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Objekt mit zwei Freiheitsgraden: Angler</b>	<b>21</b>
4.1	Objektbeschreibung . . . . .	21
4.2	Vorbetrachtung . . . . .	21
4.3	Bewegungsanalyse des Anglers mit Gummiband . . . . .	25
4.4	Bewegungsanalyse des Anglers mit unelastischem Seil . . . . .	30
4.5	Zusammenfassung . . . . .	33
4.6	Betrachtung der Morphologie . . . . .	34
4.6.1	Abstand des $MMP_{(1)}$ zum Drehpunkt des Gelenks $G_1$ . . . . .	35
4.6.2	Einfluss der Auslenkung des oberen Segments auf die Verschiebung des $MMP_{(1)}$ . . . . .	36
4.6.3	Einfluss der Segmentanordnung auf die Kraftübertragung zum Lösen der Klettverbindung . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Objekt mit zwei Freiheitsgraden und einem aktiven und einem passiven Gelenk: Angler</b>	<b>41</b>
5.1	Objektbeschreibung . . . . .	41
5.2	Vorbetrachtung . . . . .	41
5.3	Bewegungsanalyse des Anglers mit einem passiven und einem aktiven Gelenk . . . . .	43
5.4	Zusammenfassung . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Objekt mit zwei Freiheitsgraden: Ovaloid</b>	<b>50</b>
6.1	Objektbeschreibung . . . . .	50

6.2	Vorbetrachtung . . . . .	50
6.3	Bewegungsanalyse des Ovaloids - Rotationsbewegung . . . . .	53
6.4	Bewegungsanalyse des Ovaloids - Aufstehbewegung . . . . .	57
6.5	Zusammenfassung . . . . .	61
6.6	Betrachtung der Morphologie . . . . .	62
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>68</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>70</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>71</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>72</b>

# 1 Einleitung

Roboter nehmen einen stetig wachsenden Stellenwert in unserem Leben ein. Waren bis vor wenigen Jahren lediglich Industrieroboter der Allgemeinheit bekannt, so haben mittlerweile Serviceroboter, die unser tägliches Leben erleichtern und für uns beispielsweise Staub saugen oder den Rasen mähen, aber auch Spielzeugroboter wie der Roboter-Hund Aibo, vermehrt Einzug in unser Leben gehalten. Betrachtet man die Morphologien dieser Roboter so wird deutlich, dass diese sich grundlegend voneinander unterscheiden, da sie im Hinblick auf Einsatz- und Aufgabengebiet des Roboters entworfen und konstruiert wurde. Ein massiver Industrieroboter, der schwere Gegenstände bewegen muss, hat eine andere Morphologie als ein Rasenmäherroboter, der klein und wendig sein muss. Die Anpassung der Morphologie im Hinblick auf Funktionalität und Umwelt entspricht der Natur. Kein Lebewesen ist perfekt an die gesamte Umwelt angepasst, sondern an die ökologische Nische in der es lebt: „[...] there is no such thing as a 'universal animal'“ [8], S.94).

Auch wenn das Verhaltensspektrum eines Aibo Hundes bereits deutlich größer als das eines Industrieroboters ist, sind doch all diese Roboter hinsichtlich ihrer Funktionalität eingeschränkt. Sollten sich die funktionalen Anforderungen oder die Umwelt, in der sie agieren, verändern, könnten sie kaum oder gar nicht darauf reagieren, da sie nicht oder nur bedingt lernfähig sind. Das Ziel der Künstlichen Intelligenz (KI), dass ein Roboter wie ein Mensch agiert, d.h. Kreativität besitzt und Probleme erkennen und lösen kann, ist bisher nicht erfüllt.

Die Forschung der vergangenen Jahre hat gezeigt, dass dieses Ziel auch nicht leicht zu erreichen ist. Nachdem man jahrelang dem klassischen Ansatz der KI gefolgt ist, erfolgte in den 1980er Jahren ein Umdenken. Der klassische Ansatz der KI verstand Intelligenz als Symbolverarbeitung. Die Verhaltenssteuerung eines Roboters erfolgte in sequentieller Abarbeitung, wobei zunächst die Sensordaten interpretiert wurden, anhand dieser eine Entscheidung gefällt wurde und dies schließlich zu einer Motorsteuerung führte. Die Erfolge, die man mit diesem Ansatz erreichte, sind durchaus beachtlich. So konnte der am Stanford Research Institute entwickelte Roboter Shakey bereits zwischen Räumen navigieren, Hindernissen ausweichen und Kisten verschieben. Allerdings konnte er dies nur in der definierten Laborumgebung, in der beispielsweise auch die Hindernisse einfarbig waren und eine festgelegte Form hatten [6]. Probleme wie eine langsame Verarbeitung, Schwierigkeiten bei der Aufbereitung der Sensor-Rohdaten in die symbolische Information für das Inferenzsystem und die Inflexibilität, sich an eine sich verändernde Umwelt anzupassen, führten schließlich zu einem Umdenken. Marvin Minsky soll die Anfangsjahre der klassischen KI einmal mit folgenden Worten beschrieben haben: „KI-Forscher haben sich mit Problemen beschäftigt, die Menschen schwierig finden, wie etwa Schachspielen, aber sie sind nicht mit den Problemen vorangekommen, die Menschen leicht finden.“

Der neue Ansatz, auch als Embodiment bezeichnet, vertritt die Auffassung, dass

sich Intelligenz nur durch eine Interaktion des Körpers mit der Umwelt entwickeln kann [2][3]. Das Verhalten kann nicht mehr auf ein Kontrollprogramm reduziert werden, sondern ist immer eine Interaktion zwischen Kontrollprogramm, Morphologie und Umwelt: „Behavior is the result of an agent interacting with the real world, which includes not only the agents´ neural system but also its entire body:[ ...]“ [7], S.75.

Welchen Einfluss die Morphologie auf das Verhalten in diesem Zusammenhang hat, wird in dem Experiment „Swiss Robots“ aus [7] deutlich. Die käferähnlichen Swiss Robots bewegen sich in einem Raum mit Styroporboxen. Anhand von seitlich angebrachten Infrarotsensoren bestimmen sie den Abstand zu einem Objekt und weichen diesem aus. Aufgrund der seitlichen Sensoranordnung schieben sie die Boxen zu Gruppen zusammen - sie räumen auf. Wird jedoch einer der Sensoren nach vorn ausgerichtet, verändert sich das Verhalten, obwohl die Umwelt gleich geblieben ist. Bereits in den 1980er Jahren zeigte Valentino Braitenberg mit seinen Vehikeln, welche teilweise komplexen Verhaltensweisen mittels einer Sensor-Aktor-Kopplung erzeugt werden können [1]. Er legte keinen Wert auf eine interne Informationsverarbeitung, sondern leitete die Eingabereize der Sensoren über verstärkende oder hemmende Verbindungen direkt an die Motoren weiter und steuerte sie damit an. Die Vehikel konnten dadurch autark auf Umweltreize wie Lichtquellen reagieren.

Das komplexe Verhalten, das durch die Interaktion von Roboter und Umwelt mittels Sensorik erreicht werden kann, wird auch am Roboter Semni oder dem aufstehenden Bein des Roboters Myon, beide am Labor für Neurorobotik (NRL) entwickelt, deutlich. Die dort entwickelte sensomotorische Schleife „Cognitive Sensorimotor Loop“ (CSL) ermöglicht es beispielsweise dem Roboterbein vollständig allein aufzustehen [5]. Mit Hilfe des ABC-Learning, das auf CSL aufbaut und auf dem Umschalten zwischen CSL-Modi basiert, können innerhalb kürzester Zeit fast alle stabilen und energieeffizienten Posen des Roboters Semni gefunden werden [4]. In der vorliegenden Arbeit werden Roboter hinsichtlich des Einflusses der Morphologie auf ihr Verhalten untersucht. Die Gelenke dieser Roboter werden ebenfalls mittels CSL angesteuert.

## 1.1 Ziel der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss der Morphologie auf das Verhalten von Robotern analysiert, deren Gelenke mittels CSL angesteuert werden. Die der Analyse zugrunde liegenden Videosequenzen sind im Rahmen der Zusammenarbeit des NRL mit dem japanischen Designer S. Yamanaka entstanden, der die in den Videos gezeigten Roboter entworfen hat. Die Roboter unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Morphologie wie der äußeren Form, der Lage der Massenmittelpunkte, der Anzahl der Segmente und Gelenke sowie der Funktionalität, für die sie entworfen wurden. Während einige Roboter an einen festen Standpunkt gebunden sind, wurden andere wiederum für eine Bewegung in ihrer Umwelt konstruiert.

Zunächst wird jeder Roboter hinsichtlich seiner morphologischen Eigenheiten wie der äußeren Form, der Lage der Massenmittelpunkte, der Anzahl der Gelenke sowie der Anzahl der aktiven Gelenke untersucht. Das Verhalten des Roboters wird hinsichtlich des Zusammenspiels von Morphologie und Ansteuerung der Servoantriebe mittels CSL untersucht, während lediglich die Gewichtskraft auf den Roboter wirkt. Weiterhin

wird analysiert, inwiefern sich das Verhalten ändert, wenn zusätzliche Umwelteinflüsse auf den Roboter wirken, sich die Umwelt verändert und/oder die Morphologie. Abschließend wird die Morphologie jedes Roboters variiert und untersucht. Anhand theoretischer Betrachtungen wird somit analysiert, welchen Einfluss eine Änderung der Morphologie auf das Verhalten in der jeweiligen Umgebung zur Folge hätte und welche Morphologie zum Erreichen bestimmter Zielstellungen am besten geeignet ist bzw. welche Vor- und Nachteile sich aus den unterschiedlichen Morphologievarianten ergeben.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit strukturiert sich folgendermaßen. In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen erläutert, die für das Verständnis der Arbeit erforderlich sind. Es wird auf die physikalischen Grundlagen eingegangen, die die Voraussetzung für die Bewegungsanalyse der Roboter in den folgenden Kapiteln sind. Des Weiteren wird die Funktionsweise der sensomotorischen Schleife CSL beschrieben.

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit der Bewegungsanalyse unterschiedlicher Roboter, deren Servoantriebe in den Gelenken mittels CSL angesteuert werden. Da es sich bei den Gelenken der Roboter um Drehgelenke handelt, werden die Begriffe Freiheitsgrad und Gelenk synonym verwendet.

Zunächst wird in Kapitel 3 das Verhalten des Roboters Wippe, bestehend aus zwei Segmenten und einem Freiheitsgrad, analysiert. Anhand zweier Bewegungssequenzen wird auf die Auswirkung einer unterschiedlichen Ausgangsposition des Roboters eingegangen. Anschließend erfolgt eine theoretische Betrachtung, welche Auswirkung die Veränderung der Form eines Segments des Roboters auf das Verhalten hat.

Das anschließende Kapitel 4 beschäftigt sich mit dem Verhalten des Roboters Angler, der aus drei zum Teil unterschiedlich langen Segmenten besteht und zwei Freiheitsgrade aufweist. Unter Verwendung zweier verschiedener Bewegungssequenzen wird analysiert, welchen Einfluss eine ungedämpfte Kraftübertragung im Gegensatz zu einer gedämpften Kraftübertragung auf das Verhalten des Roboters hat. Darüber hinaus wird untersucht, welche Auswirkungen eine Änderung der Anordnung der einzelnen Segmente des Roboters und der damit zusammenhängenden Veränderung der Lage der Massenmittelpunkte auf das Verhalten des Roboters hat.

In Kapitel 5 wird ebenfalls der Roboter Angler analysiert, wobei die Morphologie insofern geändert wurde, dass nur eines der beiden Gelenke des Anglers mittels CSL angesteuert wird und sich der Roboter darüber hinaus in einer völlig anderen Umgebung befindet. Anhand einer Bewegungssequenz soll verdeutlicht werden, welche Verhaltensänderungen sich aus einer Änderung der Morphologie und veränderten Umweltbedingungen ergeben.

Während in den vorangegangenen Kapiteln Roboter analysiert wurden, die nicht für eine Fortbewegung auf einer Oberfläche konzipiert sind, wird in Kapitel 6 der Roboter Ovaloid analysiert, der zwei Freiheitsgrade besitzt und für eine freie Bewegung konstruiert ist, so dass er sich auf einer Oberfläche fortbewegen kann. Anhand zweier Bewegungssequenzen wird zunächst das Verhaltensspektrum des Ovaloids analysiert und anschließend auf die Auswirkungen bzgl. des Verhaltens eingegangen, die sich aus

einer Änderung der Segmentform des Ovaloids ergeben würden. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Verhaltensanalysen und ein Ausblick auf mögliche weitere Untersuchungen.



## 2 Grundlagen der Arbeit

In diesem Kapitel werden zunächst die physikalischen Grundlagen erklärt, die unter anderem die Basis für die Verhaltensanalysen der Roboter in den Folgekapiteln bilden. Des Weiteren wird die Funktionalität der sensomotorischen Schleife CSL erläutert sowie auf die unterschiedlichen Verhaltensmodi, die CSL aufweist, eingegangen.

### 2.1 Physikalische Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird kurz auf die physikalischen Größen eingegangen, die zum Verständnis der Arbeit unerlässlich sind. Alle angegebenen Einheiten beziehen sich auf das Internationale Einheitensystem.

#### Kraft

Die Kraft  $\vec{F}$  ist eine gerichtete Größe, die sich aus dem Produkt von Masse  $m$  und Beschleunigung  $\vec{a}$  berechnet. Die Kraft, die auf einen Körper wirkt, kann den Bewegungszustand dieses Körpers verändern.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (2.1)$$

Einheit der Kraft  $\vec{F}$ : Newton (N) =  $kg \cdot \frac{m}{s^2}$

#### Gewichtskraft

Die Gewichtskraft  $\vec{F}_g$  ist das Produkt aus der Masse  $m$  eines Körpers und der an seinem Ort herrschenden Fallbeschleunigung, in diesem Fall die Erdbeschleunigung  $\vec{g}$ .

$$\vec{F}_g = m \cdot \vec{g} \quad (2.2)$$

Einheit der Gewichtskraft  $\vec{F}_g$ : Newton (N) =  $kg \cdot \frac{m}{s^2}$

#### Impuls

Um die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  eines Körpers zu ändern, muss ein Impuls  $\vec{p}$  übertragen werden.

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \quad (2.3)$$

Differenziert man die Gleichung nach der Zeit, so ist die auf einen Körper wirkende Kraft  $\vec{F}$  identisch mit der Änderung des Impulses eines Körpers pro Zeiteinheit  $\frac{d\vec{p}}{dt}$ .

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a} = \vec{F} \quad (2.4)$$

Einheit des Impuls  $\vec{p}$ : N·s

## Impulserhaltungssatz

In einem kräftemäßig abgeschlossenen System bleibt der Gesamtimpuls  $\vec{p}_{ges}$  erhalten. Es gilt:

$$\vec{p}_{ges} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{v}_i = \textit{konstant} \quad (2.5)$$

## Kinetische Energie

Zudem lässt sich zwischen Impuls, Masse und kinetischer Energie folgender Zusammenhang bilden: Kinetische Energie  $E_{kin}$  ist die Fähigkeit eines Körpers aufgrund seiner Bewegung mechanische Arbeit  $W$  zu verrichten. Die kinetische Energie eines sich bewegenden Körpers hängt von seiner Masse  $m$  und seiner Geschwindigkeit  $v$  ab.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2.6)$$

Einheit der kinetischen Energie  $E_{kin}$  : Joule (J) =  $\frac{kg \cdot m^2}{s^2}$

## Potentielle Energie

Ein Körper kann aufgrund seiner Lage bzgl. des Abstandes zu einer Referenzebene Energie besitzen. Diese potentielle Energie berechnet sich aus dem Produkt von Masse  $m$ , Erdbeschleunigung  $g$  und Abstand  $h$ .

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h \quad (2.7)$$

Einheit der potentiellen Energie  $E_{pot}$  : Joule (J)

## Arbeit

Mechanische Arbeit  $W$  wird verrichtet, wenn ein Körper durch eine Kraft  $\vec{F}$  bewegt oder verformt wird. Ist die Kraft konstant und wirkt in Richtung des Weges  $s$ , so gilt:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} \quad (2.8)$$

Ist die Kraft entlang des gesamten Weges  $\vec{F}(s)$  nicht konstant oder der Weg nicht gerade, so ist die Arbeit das Integral über den Weg, wobei  $s_1$  den Anfangs- und  $s_2$  den Endpunkt des Weges bezeichnen.

$$W = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F}(s) \cdot d\vec{s} \quad (2.9)$$

Einheit der Arbeit  $W$ : Joule (J)

## Drehmoment

Das Drehmoment  $\vec{M}$  ist eine Kraft, die einen Körper um eine Drehachse beschleunigen oder bremsen kann. Das Drehmoment bezieht sich stets auf den Abstand zwischen dem Angriffspunkt der Kraft und der Drehachse, wobei dies als Hebel bezeichnet wird. Der senkrecht gemessene Abstand zwischen der Wirklinie der Kraft und dem Drehpunkt des Körpers wird als wirksamer Hebelarm bezeichnet. Allgemein berechnet sich das Drehmoment über das Vektorprodukt des Hebelarms  $\vec{r}$  und der angreifenden Kraft  $\vec{F}$ .

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2.10)$$

Wirkt eine Kraft senkrecht auf den Hebelarm der Länge  $r$ , so berechnet sich das Drehmoment aus dem Produkt der Länge des Hebelarms und dem Betrag der Kraft. Befinden sich alle Abstandsvektoren und Kräfte in einer Ebene und liegt diese orthogonal zur Drehachse, so können sämtliche Drehmomente als Skalare aufgefasst werden und die Richtungsangabe reduziert sich auf das Vorzeichen des Drehmoments. Momente, die entgegen dem Uhrzeigersinn wirken werden positiv gezählt, Momente im Uhrzeigersinn entsprechend negativ.

$$M = r \cdot F \quad (2.11)$$

Momentengleichgewicht: Ein Körper befindet sich im Momentengleichgewicht, wenn die Summe aller Momente, die auf den Drehpunkt wirkt, Null ist.

$$\sum_i \vec{M}_i = \vec{0} \quad (2.12)$$

## Reibung

Reibung ist die Hemmung einer Bewegung, die an den Kontaktflächen der sich berührenden Festkörper auftritt. Die Reibungskraft  $\vec{F}_R$  ist das Produkt aus Reibungskoeffizienten  $\mu$  und Normalkraft  $\vec{F}_N$ .

$$\vec{F}_R = \mu \cdot \vec{F}_N \quad (2.13)$$

Es gibt verschiedene Arten von Reibung, u. a. Haftreibung, Gleitreibung und Rollreibung. Wenn sich die berührenden Festkörper in Ruhe befinden, tritt Haftreibung auf. Bewegen sich die berührenden Körper in relativer Bewegung zueinander, tritt Gleitreibung auf. Der Reibungskoeffizient ist, ausgehend von gleichen äußeren Bedingungen, bei der Gleitreibung geringer als bei der Haftreibung.

Bei der Rollreibung spielt neben der Materialpaarung, die sich im Reibungskoeffizienten widerspiegelt, auch die Geometrie des Rollkörpers eine Rolle. Der Reibungskoeffizient wird in diesem Fall aus dem Quotienten der Rollreibungslänge und dem Radius des Rollkörpers berechnet.

## 2.2 Cognitive Sensorimotor Loop - CSL

Das im Folgenden beschriebene Cognitive Sensorimotor Loop (CSL) beruht auf dem Prinzip einer geschlossenen sensorimotorischen Schleife. Aufgrund von sensorischen Ein-

gangsdaten werden Motorausgangsdaten berechnet, wodurch wiederum eine Änderung der sensorischen Eingangsdaten erzeugt wird.

Die Abbildung 2.1 zeigt die Funktionsweise des CSL als Blockschaltbild, die zugehörige Update-Regel ist in diskreter Form in der Gleichung 2.14 dargestellt. Als Eingangsdatum für das CSL wird der Gelenkwinkel  $\varphi$  verwendet, wobei es sich jedoch nicht um eine absolute Winkelangabe handelt. Das berechnete Ausgangsdatum  $u(t)$  entspricht der Pulsweite mit der der Servomotor angetrieben wird. Für die korrekte Funktionsweise des CSL ist es wichtig, dass die Drehrichtung von Gelenkwinkel und Motor übereinstimmt.

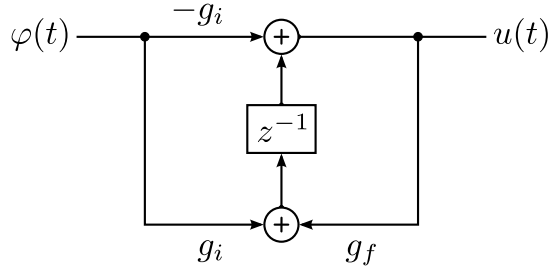


Abbildung 2.1: CSL als Blockschaltbild

$$u(t) = -g_i\varphi(t) + g_i\varphi(t-1) + g_f u(t-1) \quad (2.14)$$

$$u(t) = -g_i \underbrace{(\varphi(t) - \varphi(t-1))}_{\omega(t)} + g_f u(t-1) \quad (2.15)$$

CSL lässt sich in zwei funktionale Einheiten, den Differentiator und den Intergrator, zerlegen. Die linke Seite des Blockschaltbildes zeigt den Differentiator, bestehend aus den Parametern  $g_i$  und  $-g_i$  sowie der Verzögerungseinheit  $z^{-1}$ . Das Ergebnis dieses Berechnungsschrittes ist die erste Ableitung des Winkels, welche annähernd der Winkelgeschwindigkeit  $\omega(t)$  entspricht (vgl. Gleichung 2.15). Aus diesem Grund wird auch keine absolute Winkelangabe benötigt.

Die rechte Seite des Blockschaltbildes zeigt für  $g_f > 0$  die Realisierung eines Integrators, bestehend aus den Parametern  $g_f$  und  $u(t-1)$ . Je nach Wertebereich des Parameter  $g_f$  handelt es sich um einen leckenden Integrator für  $0 < g_f < 1$ , einen idealen Integrator für  $g_f = 1$  oder um eine zusätzliche Signalverstärkung für  $g_f > 1$ .

### CSL-Verhaltensmodi

In Abhängigkeit der Wertebereiche der Parameter  $g_i$  und  $g_f$  weist das CSL vier unterschiedliche Verhaltensmodi auf. Für die in den folgenden Kapiteln durchgeführten Untersuchungen, Analysen und Experimente werden die Servoantriebe ausnahmslos im Contraction Mode betrieben, wobei die exakten Einstellungen der Parameter  $g_i$  und  $g_f$  innerhalb des Wertebereichs des Contraction Mode variieren. Im Folgenden werden

die Modi Release Mode, Hold Mode, Support Mode und Contraction Mode beschrieben, wobei der Contraction Mode ausführlich betrachtet wird. Die Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht der CSL-Verhaltensmodi und die entsprechenden Wertebereiche für die Parameter  $g_i$  und  $g_f$ .

Release Mode	Hold Mode	Support Mode	Contraction Mode
$g_i > 0$	$g_i > 0$	$g_i < 0$	$g_i > 0$
$0 \leq g_f < 1$	$g_f = 1$	$g_f = 0$	$g_f > 1$

Tabelle 2.1: Verhaltensmodi des CSL <sup>1</sup>

### Release Mode

Im Release Mode bewirken die Wertebereiche der Parameter  $g_i > 0$  und  $0 \leq g_f < 1$  die Hemmung einer Bewegung. Bei einer schnellen Winkeländerung, d.h. bei erhöhter Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , ändert sich das Vorzeichen der Ausgangsspannung  $u(t)$  und ein Drehmoment entgegen der Bewegungsrichtung wird erzeugt.

### Hold Mode

Im Hold Mode ist der Parameter  $g_i > 0$  und die Winkelgeschwindigkeit geht somit negativ in die Berechnung für  $u(t)$  ein. Da der Parameter  $g_f = 1$  ist, ist die Winkelgeschwindigkeit proportional zur Ausgangsspannung  $u(t)$  und es wird ein Drehmoment entgegen der Bewegungsrichtung erzeugt. Wird in einer beliebigen Winkelposition in den Hold Mode geschaltet, so regelt das CSL nach einer Auslenkung diese Winkelposition wieder ein. Wie exakt diese Regulierung ausfällt ist von der Einstellung des Parameters  $g_i$  abhängig - mit einer optimalen Einstellung kann die Winkelposition exakt gehalten werden.

### Support Mode

Befindet sich das CSL im Support Mode, wird die Winkelgeschwindigkeit aufgrund der Parameter  $g_i < 0$  und  $g_f = 0$  positiv, so dass am Servomotor ein Drehmoment in Bewegungsrichtung erzeugt und die aktuelle Bewegung unterstützt wird.

### Contraction Mode

Im Contraction Mode arbeitet das CSL gegen jede Art von einwirkender Kraft wie beispielsweise die Erdanziehungskraft, Haftreibung oder eine manuelle Auslenkung. Die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  geht negativ in die Berechnung für  $u(t)$  ein und wird durch  $g_f > 1$  zusätzlich verstärkt.

<sup>1</sup>Tabelle geändert übernommen aus [5]

Die Funktionsweise des CSL im Contraction Mode wird im Folgenden anhand eines Pendels näher betrachtet. Die Bewegungssteuerung des Pendelarms erfolgt über einen Servoantrieb, der im Contraction Mode angesteuert wird. Geht man davon aus, dass es sich um ein ideales System ohne Rauschen handelt und sich das Pendel in der Ruheposition befindet, würde das Pendel in dieser Position verbleiben. Da zwar die Gewichtskraft  $F_g$  wirkt, die Kraftwirkungslinie jedoch senkrecht durch die Drehachse verläuft, somit kein wirksamer Hebelarm vorhanden ist und daher kein Moment auf den Antrieb des Pendels einwirkt, tritt auch keine Winkeländerung auf, so dass  $u(t)$  ebenfalls Null ist.

Befindet sich das Pendel in einer beliebigen ausgelenkten Position, so wirkt die Gewichtskraft nicht mehr senkrecht durch die Drehachse, so dass ein wirksamer Hebelarm vorhanden ist und somit ein Moment auf den Antrieb des Pendels wirkt. Die Änderung des Winkels wird durch CSL erfasst und geht aufgrund des Wertebereichs für den Parameter  $g_i > 0$  negativ in die Berechnung ein und wird durch  $g_f > 1$  verstärkt. Das Ergebnis ist ein entgegengesetztes Drehmoment zur einwirkenden Kraft (vgl. Abb. 2.2).

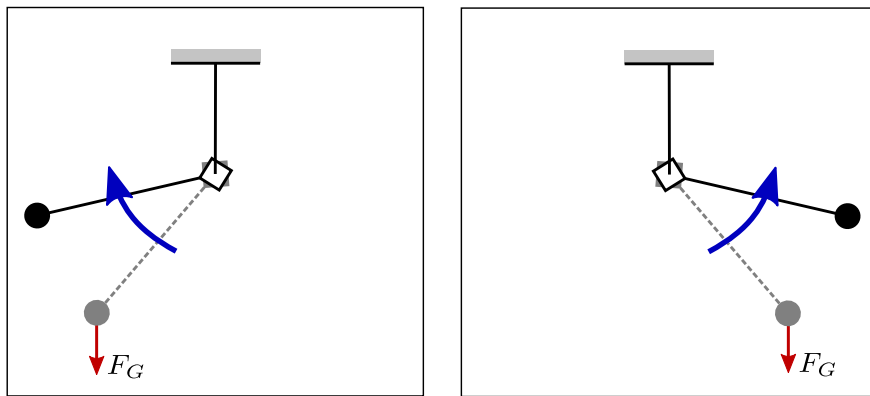


Abbildung 2.2: Bewegungssteuerung eines Pendels im Contraction Mode.<sup>2</sup>

Unter Umständen, wie beispielsweise dem Festhalten des Pendels, kann es zu einem exponentiellen Wachstum des Ausgangsparameters  $u(t)$  kommen, so dass der Betrag des Parameters ins Unendliche wächst. Aus diesem Grund erfolgt eine Begrenzung des Ausgangsparameters auf das Intervall  $[-1; 1]$  ([10], S. 34 f.).

<sup>2</sup>Abbildung geändert übernommen aus [5]

## 3 Objekt mit einem Freiheitsgrad: Wippe

Im Folgenden wird das Verhalten des Roboters Wippe untersucht, der aus zwei Segmenten und einem Gelenk besteht. Es wird analysiert, welche Verhaltensänderungen auftreten, wenn die Standposition des Roboters verändert wird. Darüber hinaus wird untersucht, welchen Einfluss die Form der Segmente auf das Verhalten hat und inwiefern sich das Verhalten ändert, wenn die Segmentform verändert wird.

### 3.1 Objektbeschreibung

Die Wippe ist eine Holzkonstruktion und besteht aus zwei Segmenten, die über ein Drehgelenk miteinander verbunden sind (vgl. Abbildung 3.1). Das untere Segment der Wippe besteht aus einer rechteckigen Grundfläche. Senkrecht zu dieser und fest verbunden mit ihr befinden sich zwei parallel zueinander angeordnete Elemente. Zwischen diesen beiden Elementen befindet sich der Servoantrieb, ein Dynamixel RX-28 [9], welcher über sein Ruderhorn mit beiden Elementen verbunden ist. Der Servoantrieb wird mittels CSL angesteuert. Das obere Segment der Wippe besteht aus zwei senkrechten und gekrümmten Elementen, die parallel und mit einem definierten Abstand zueinander angeordnet sind und somit eine Lauffläche für eine Kugel darstellen, im Folgenden als Wippenarm bezeichnet. Die Enden des Wippenarms sind begrenzt, sodass die Kugel nicht über die Enden der Lauffläche hinaus rollen kann. Die Krümmung des Wippenarms hat ihren tiefsten Punkt im geometrischen Mittelpunkt. An diesem befindet sich ebenfalls die Aufnahme des Servoantriebs. Drehpunkt der Wippe ist somit die Achse des Servoantriebs. Der Schwerpunkt des Wippenarms befindet sich oberhalb des Drehpunkts. Für die Beschreibung der Wippenbewegung werden die folgenden Begriffe verwendet: der Abschnitt des Wippenarms, der sich links vom Drehpunkt befindet, wird als linker Wippenarm bezeichnet, der rechte Abschnitt analog als rechter Wippenarm.

### 3.2 Vorbetrachtung

Wie in Abbildung 3.2 zu sehen, wird zunächst die Wippe schematisch betrachtet. Das Gesamtmoment  $M_{ges}$ , welches im Drehpunkt wirkt, wird lediglich durch die im Massenmittelpunkt des Wippenarms  $MMP_{Wippenarm}$  angreifende Gewichtskraft beeinflusst.

Im ausbalancierten Zustand, wie in Abbildung 3.2 links dargestellt, ist das Gesamtmoment  $M_{ges}$  im Drehpunkt Null, da die Kraftwirkungslinie der im  $MMP_{Wippenarm}$  angreifenden Gewichtskraft durch die Drehachse verläuft und somit kein Moment im Drehpunkt erzeugt. Unter der Voraussetzung, dass  $u(t-1) = 0$  und  $\omega = 0$ , bedeutet

dies für die Ansteuerung des Servoantriebs mittels CSL, dass kein Drehmoment am Drehpunkt durch CSL erzeugt wird.

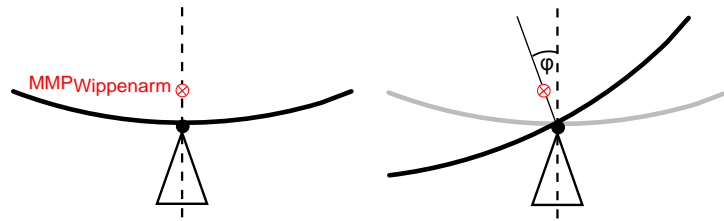


Abbildung 3.1: Wippe    Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Wippe im ausbalancierten Zustand (links) und im ausgelenkten Zustand mit Verschiebung des  $MMP_{Wippenarm}$  (rechts).

Befindet sich der Wippenarm in einer beliebig ausgelenkten Position entgegen des Uhrzeigersinns, wie in Abbildung 3.2 rechts dargestellt, so ist das Gesamtmoment  $M_{ges}$  im Drehpunkt positiv. Analog wäre  $M_{ges}$  negativ, wenn die Auslenkung des Wippenarms im Uhrzeigersinn erfolgt wäre. Aufgrund der Auslenkung des Wippenarms entgegen des Uhrzeigersinns verlagert sich der  $MMP_{Wippenarm}$  entsprechend und das Gesamtmoment  $M_{ges}$  wird positiv. Ohne zusätzlichen Einfluss wie CSL würde sich der Wippenarm immer weiter entgegen des Uhrzeigersinns neigen, bis er auf der Unterlage aufliegt. Aufgrund des positiven Gesamtmoments  $M_{ges}$  tritt eine Winkeländerung auf, die durch CSL erfasst wird und führt unter der Voraussetzung, dass CSL im Contraction Mode betrieben wird, zu einer Änderung des Ausgangsparameters  $u(t)$ , so dass durch den Servoantrieb eine entsprechende Gegenbewegung des Wippenarms erfolgt.

### 3.3 Bewegungsanalyse der Wippe im waagerechten Stand

Im folgenden Versuch steht die Wippe mit ihrer rechteckigen Grundfläche waagerecht auf dem Boden. Der gekrümmte Wippenarm ist leicht entgegen des Uhrzeigersinns geneigt und der Servoantrieb, welcher mittels CSL im Contraction Mode angesteuert wird, ist eingeschaltet, wobei die exakten Werte der CSL-Parameter  $g_i$  und  $g_f$  unbekannt sind (vgl. Abb. 3.3, Bild a). Im Verlauf der Bewegungssequenz wird eine Kugel auf der Lauffläche der Wippe positioniert. Die im Massenmittelpunkt der Kugel  $MMP_{Kugel}$  angreifende Gewichtskraft sowie der zugehörige wirksame Hebelarm zwischen  $MMP_{Kugel}$  und Drehpunkt bewirken ein Moment im Drehpunkt, welches in das Gesamtmoment  $M_{ges}$  eingeht. Das Gesamtmoment ist demnach die Summe aus den Momenten, welche durch die Gewichtskraft der Kugel und die Gewichtskraft des Wippenarms hervorgerufen werden.

#### Bewegungsbeschreibung Bildsequenz a - b

Zu Beginn dieser Bewegungssequenz wird der Servoantrieb bereits mittels CSL angesteuert und der Wippenarm bewegt sich im Uhrzeigersinn. Der Wippenarm befindet



sich noch nicht im ausbalancierten Zustand, sondern ist entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt, während am rechten Ende des Wippenarms eine Kugel auf der Lauffläche positioniert wird. Der Wippenarm neigt sich daraufhin um einige Grad im Uhrzeigersinn.

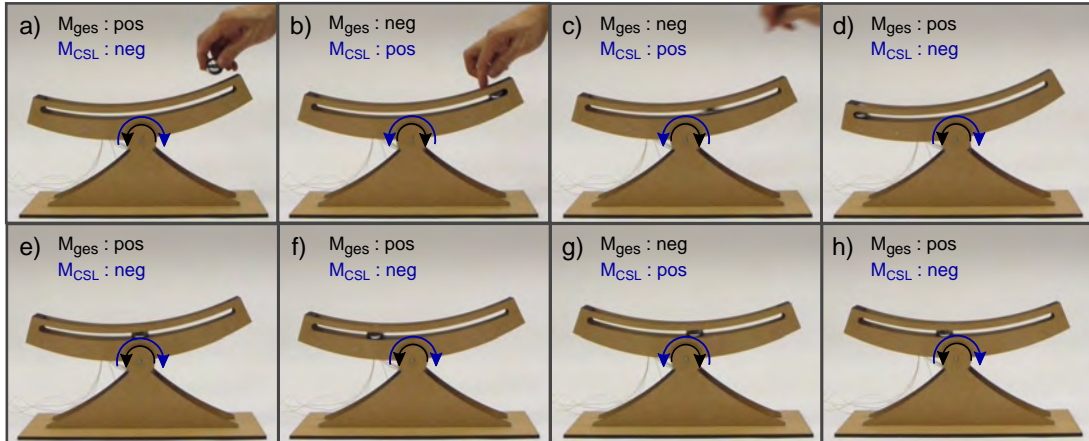


Abbildung 3.3: Bewegungssequenz der Wippe mit zusätzlichem Umwelteinfluss (Kugel): Das Gesamtmoment  $M_{ges}$ , welches im Drehpunkt wirkt, ist die Summe aus den Momenten, welches durch die Gewichtskraft der Kugel und die Gewichtskraft des Wippenarms hervorgerufen wird. Die entsprechende Bewegungsrichtung des Wippenarms ist schwarz dargestellt. Das durch CSL hervorgerufene Drehmoment  $M_{CSL}$  ist blau dargestellt.

### Funktionsbeschreibung Bildsequenz a - b

Bevor ein ausbalancierter Zustand des Wippenarms, als Folge der Ansteuerung des Servoantriebs durch CSL, vollständig erreicht wird, wird eine Kugel an das äußere Ende des rechten Wippenarms positioniert. Durch die Gewichtskraft  $F_g$  der Kugel und der Länge des Hebelarms (Abstand zum Drehpunkt) wird ein zusätzliches negatives Moment eingebracht, wodurch der Wippenarm um wenige Grad im Uhrzeigersinn ausgelenkt wird. Das Gesamtmoment  $M_{ges}$  im Drehpunkt wird somit negativ.

Die sichtbare Auslenkung des Wippenarms um lediglich wenige Grad lässt zwei Rückschlüsse zu. Zum einen ist das durch die Kugel eingebrachte negative Moment nicht signifikant größer als die Summe des in positiver Drehrichtung wirkenden Trägheitsmoments des Wippenarms und des Reibungsmoments im Lager und Getriebe des Servoantriebs. Zum anderen wird die Kugel durch die Krümmung des Wippenarms und der damit wirkenden Hangabtriebskraft beschleunigt und nach links bewegt, wodurch die Länge des Hebelarms sofort verkürzt wird, die Hebelwirkung somit gemindert und das negative Moment geringer wird (vgl. Kapitel 2.1).

Die Auslenkung des Wippenarms durch die Kugel hat folgenden Einfluss auf die Regelung durch CSL. Der Betrag des Winkels am Ruderhorn und damit am Wippenarm, gemessen im Servoantrieb, ändert sich. Die Änderung des Betrags wird als Winkeländerung durch CSL erfasst und führt zu einer Änderung der Ausgangsspannung für den Servoantrieb. Als Resultat wird ein positives Drehmoment durch den Servoantrieb erzeugt und das Gesamtmoment  $M_{ges}$  im Drehpunkt wird ebenfalls positiv, wodurch der Wippenarm entgegen des Uhrzeigersinns bewegt wird.

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz c - d**

Die Kugel rollt nach links über den Drehpunkt hinaus auf den linken Wippenarm. Sie prallt gegen den linken Anschlag, wird dort abrupt abgebremst und kehrt anschließend ihre Rollrichtung um. Während der gesamten Zeit wird der Wippenarm entgegen des Uhrzeigersinns bewegt.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz c - d**

Während der Bewegung der Kugel nach links nimmt das negative Moment, das durch die Kugel in das Gesamtmoment  $M_{ges}$  eingeht, proportional zur Verkürzung des Hebelarms ab und kehrt sich, nachdem die Kugel den Drehpunkt passiert hat, in ein positives Moment um. Für die Regelung des Wippenarms durch CSL bedeutet das durch die Kugel hervorgerufene positive Moment, dass erneut eine Winkeländerung erfasst wird. Diese führt zu einer Änderung der Ausgangsspannung für den Servoantrieb, so dass der Wippenarm im Uhrzeigersinn bewegt wird. Die Bewegung des Wippenarms im Uhrzeigersinn wird jedoch erst in der nachfolgenden Bildsequenz deutlich, da die Rollbewegung der Kugel auf der Lauffläche so schnell ist, dass die Kugel gegen den linken Anschlag des Wippenarms prallt und sich bereits wieder auf dem Weg nach rechts in Richtung des Drehpunkts befindet, wenn der Wippenarm mit der Bewegung im Uhrzeigersinn beginnt.

Aufgrund ihrer Bewegung hat die Kugel kinetische Energie und es kommt zum elastischen Stoß mit der linken Begrenzung der Lauffläche. Beim Aufprall überträgt die Kugel damit einen Impuls auf die Begrenzung des Wippenarms. Gemäß des Impulserhaltungssatzes wird ein Teil der Energie auf die Wippe übertragen, der andere Teil auf die Kugel, wobei die Kraft auf die Kugel nun in umgekehrter Richtung zur ursprünglichen Bewegung gerichtet ist. Der Impuls und damit die kinetische Energie ist ausreichend, um die Kugel in Richtung des rechten Wippenarms zu bewegen, obwohl der Winkel des Wippenarms und damit die Hangabtriebskraft sehr gering sind und die Kugel kaum eine Beschleunigung durch die Krümmung des Wippenarms erfährt (vgl. Abbildung 3.3, Bild d).

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz e - f**

Die Kugel bewegt sich in Richtung des rechten Wippenarms, wobei die Bewegung rechtsseitig vom Drehpunkt des Wippenarms zum Erliegen kommt. Anschließend kehrt die Kugel ihre Rollrichtung um, so dass sie sich auf dem Wippenarm nach links bewegt. Sie rollt ca. 1/3 des Weges auf dem Wippenarm nach links, bevor sich die Rollrich-

tung erneut umkehrt. Während der gesamten Bewegung der Kugel bewegt sich der Wippenarm kontinuierlich entgegen des Uhrzeigersinns.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz e - f**

Die Bewegung des Wippenarms im Uhrzeigersinn ist nicht schnell genug um die Kugel zu beschleunigen, da diese sich durch die Krümmung des Wippenarms und dessen aktueller Position – entgegen des Uhrzeigersinns nach links unten geneigt – bergauf bewegen muss. Die Geschwindigkeit der Kugel wird durch die Aufwärtsbewegung soweit reduziert, dass ihre Bewegung ein wenig rechts vom Drehpunkt des Wippenarms zum Erliegen kommt. Die Kugel befindet sich rechtsseitig vom Drehpunkt, so dass dadurch im Drehpunkt ein negatives Moment wirkt. Zusätzlich wirkt in Folge der Auslenkung des Wippenarms ein positives Moment. Das negative Moment, welches durch die Kugel eingebracht wird, ist geringer als das positive Moment, das durch den Wippenarm eingebracht wird, so dass das Gesamtmoment im Drehpunkt weiterhin positiv ist und der Wippenarm im Uhrzeigersinn bewegt wird. Der Drehsinn des Wippenarms bleibt zwar erhalten, die Bewegungsgeschwindigkeit verlangsamt sich jedoch in Folge des durch die Kugel hervorgerufenen negativen Moments im Drehpunkt sehr stark. Die Winkeländerung wird durch CSL erfasst und führt zu einer Verkleinerung der Ausgangsspannung  $u(t)$  für den Servoantrieb.

Das positive Gesamtmoment im Drehpunkt wird größer, sobald sich die Kugel erneut nach links bewegt. Durch die Krümmung der Wippe und die geringe Geschwindigkeit der Kugel rollt diese jedoch nur ca. 1/3 des Weges auf dem Wippenarm nach links, bevor sich die Rollrichtung wieder umkehrt. Während dieser Zeitspanne bewegt sich der Wippenarm lediglich minimal im Uhrzeigersinn. Erst in der nächsten Bildsequenz, wenn die Kugel sich bereits wieder nach rechts bewegt, wird der Einfluss des größeren positiven Gesamtmoments auf die Geschwindigkeit der Bewegung des Wippenarms im Uhrzeigersinn sichtbar.

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz g - h**

Der Wippenarm ist nur noch minimal entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt, während die Kugel ihre Rollrichtung umkehrt und erneut nach rechts rollt und sich dem Drehpunkt annähert. Zu diesem Zeitpunkt wird die Bewegung des Wippenarms im Uhrzeigersinn wieder schneller und die Kugel rollt über den Drehpunkt hinaus. Während sich die Kugel noch rechtsseitig vom Drehpunkt befindet, bewegt sich der Wippenarm entgegen des Uhrzeigersinns und die Kugel rollt nach links über den Drehpunkt hinaus.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz g - h**

Wie bereits in der Funktionsbeschreibung Bildsequenz e - f geschildert, ist aufgrund der Lage der Kugel linksseitig vom Drehpunkt und der Auslenkung des Wippenarm entgegen des Uhrzeigersinns das Gesamtmoment negativ. Die daraus resultierende Winkeländerung wird durch CSL erfasst und führt zu einer Vergrößerung der Ausgangsspannung  $u(t)$  für den Servoantrieb. Während sich die Kugel auf dem Wippenarm nach

rechts bewegt, wird der Wippenarm in Folge des negativen Drehmoments im Uhrzeigersinn bewegt und beschleunigt die Kugel, so dass diese über den Drehpunkt hinaus rollt (vgl. Bild g).

Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Wippenarm in einer ausbalancierten Position, so dass durch die im  $MMP_{Wippenarm}$  angreifende Gewichtskraft senkrecht durch die Drehachse verläuft und somit kein Moment erzeugt. Da die Kugel sich jedoch rechtsseitig bzgl. des Drehpunkt befindet, wirkt im Drehpunkt ein negatives Moment. Die Winkeländerung wird mittels CSL erfasst und führt zu einer Änderung der Ausgangsspannung  $u(t)$  für den Servoantrieb. Das Resultat ist ein positives Drehmoment, so dass der Wippenarm entgegen des Uhrzeigersinns bewegt wird. Die Kugel, die ihre Rollrichtung bereits wieder umgekehrt hat und sich nach links auf den Drehpunkt zubewegt, wird in Folge der Bewegung des Wippenarms entgegen des Uhrzeigersinns wiederum über den Drehpunkt hinaus bewegt. (vgl. Abbildung 3.3, Bild h)

Im weiteren Verlauf wiederholt sich dieses Bewegungsmuster periodisch. Der Wippenarm wird permanent im und entgegen des Uhrzeigersinns nach unten ausgelenkt, sodass die Kugel niemals ihre Ruhelage erreicht. Zu den Zeitpunkten, in denen die Kugel ihre Ruhelage erreicht hätte, wird der Wippenarm erneut bewegt. Die Bewegung der Kugel um ihre Ruhelage weist aufgrund ihrer Masse und des Krümmungsradius eine bestimmte Schwingungsfrequenz auf, die ohne äußere Einflüsse im Erreichen ihrer Ruhelage enden würde. Die Reaktionszeit des CSL auf die aus der Bewegung der Kugel hervorgerufenen periodischen Momentänderungen, ist für diesen Fall zu stark verzögert und beschleunigt somit die Kugel über den Drehpunkt und damit ihrer Ruhelage permanent hinaus. Dieses Bewegungsmuster führt jedoch auch nicht zu einem Aufschwingen des Systems.

### 3.4 Bewegungsanalyse der Wippe im gekippten Stand

Im folgenden Versuch wird die gesamte Wippe gekippt aufgestellt und die Kugel befindet sich bereits zu Beginn des Versuchs auf der Lauffläche. Wippe, Kugel sowie die CSL-Parameter  $g_i$  und  $g_f$  sind identisch zum vorangegangenen Versuch. Der mittels CSL gesteuerte Servoantrieb ist bereits eingeschaltet.

#### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz a - c**

Zunächst steht die Wippe mit ihrer rechteckigen Grundfläche waagrecht auf dem Boden. Der Wippenarm befindet sich in einer ausbalancierten Position und die Kugel liegt unmittelbar über dem Drehpunkt auf der Lauffläche des Wippenarms auf. Durch das rechtsseitige Anheben der Wippe wird die Kugel nach links ausgelenkt, so dass sie gegen den linken Anschlag der Lauffläche prallt. Anschließend kehrt sich die Bewegungsrichtung der Kugel um und sie rollt nach rechts über den Drehpunkt hinaus. Während sich die Kugel nach rechts bewegt, erfolgt gleichzeitig eine Bewegung des Wippenarms entgegen des Uhrzeigersinns.

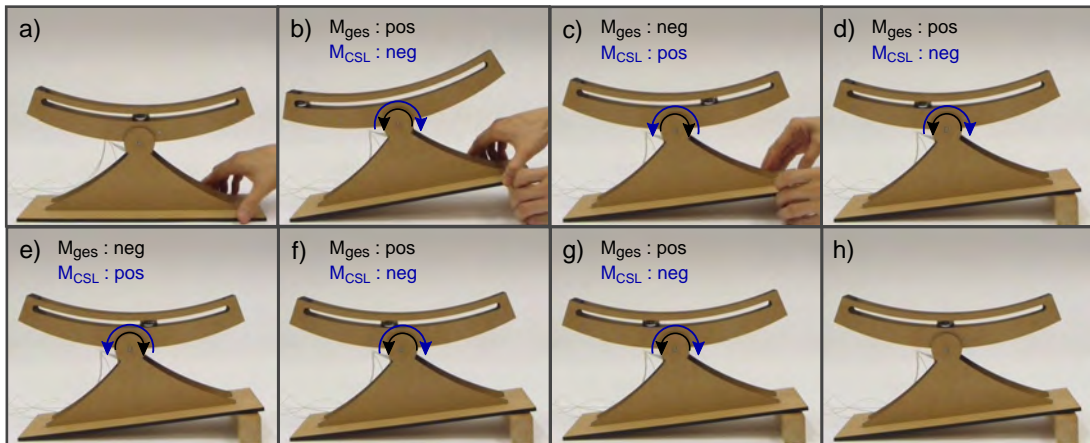


Abbildung 3.4: Bewegungssequenz der Wippe im gekippten Stand und mit zusätzlichem Umwelteinfluss (Kugel). Die durch das Gesamtmoment  $M_{ges}$  hervorgerufene Bewegung des Wippenarms ist schwarz dargestellt. Das durch CSL hervorgerufene Drehmoment  $M_{CSL}$  ist blau dargestellt. Bild a) und h) zeigen die Wippe im ausbalancierten Zustand, wobei  $M_{ges}$  und  $M_{CSL}$  Null sind.

### Funktionsbeschreibung Bildsequenz a - c

In der in Bild a dargestellten Position wirkt im Drehpunkt kein Moment, da die im Massenmittelpunkt der Kugel und im Massenmittelpunkt des Wippenarms angreifende Gewichtskraft durch die Drehachse verläuft. Durch das rechtsseitige Anheben der Wippe wird die Kugel durch die Hangabtriebskraft nach links ausgelenkt, prallt gegen den Anschlag der Lauffläche und bewegt sich entsprechend des Impulserhaltungssatzes in die entgegengesetzte Richtung – nach rechts – zurück.

In Folge der Auslenkung der Kugel nach links wird das Gesamtmoment  $M_{ges}$  im Drehpunkt positiv, wodurch sich der Betrag des Winkels, gemessen im Servoantrieb, ändert. (Die Änderung ist im Video nicht sichtbar.) Diese Betragsänderung wird durch CSL erfasst und führt zu einer Änderung der Ausgangsspannung  $u(t)$  für den Servoantrieb. Der Servoantrieb erzeugt ein negatives Drehmoment, so dass der Wippenarm im Uhrzeigersinn geneigt wird.

Obwohl die Betragsänderung des Winkels infolge der Auslenkung der Kugel nach links im Video nicht sichtbar wird, ist die Regelung durch CSL deutlich zu erkennen. Noch während sich die Kugel wieder nach rechts auf den Drehpunkt des Wippenarms zubewegt, neigt sich der Wippenarm bereits im Uhrzeigersinn.

Die Kugel wird durch die Bewegung und die Neigung des Wippenarms nach rechts über den Drehpunkt hinaus beschleunigt. Nach ca. 1/3 des Weges auf dem rechten Wippenarm kommt die Bewegung der Kugel, da sich diese in Folge der Krümmung des Wippenarms bergauf bewegt, zum Erliegen und rollt in die entgegengesetzte Richtung.

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz d - h**

Im Folgenden bewegt sich die Kugel oszillierend um den Drehpunkt auf dem rechten und linken Wippenarm, wobei der Abstand zum Drehpunkt bei jeder Auslenkung geringer wird, bis die Bewegung der Kugel zum Erliegen kommt.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz d - h**

Da der Abstand der Kugel zum Drehpunkt geringer wird, wirkt auch ein kleineres Moment im Drehpunkt, wodurch die Winkeländerung des Wippenarms geringer und die Gegensteuerung mittels CSL ebenfalls kleiner wird. Kommt die Kugel im Drehpunkt zum Liegen, sind weitere minimale durch das CSL hervorgerufene Bewegungen des Wippenarms zu erkennen, die die Kugel jedoch nicht mehr auslenken.

## **3.5 Zusammenfassung**

Die Krümmung der Lauffläche des Wippenarms hat zur Folge, dass die Kugel immer die Position ihrer minimalen potentiellen Energie einnimmt, d.h. wenn die Hangabtriebskraft Null ist. Als Ausnahmefall ist der Zustand zu nennen, bei dem die Auslenkung des Wippenarms so groß ist, dass die Kugel die Begrenzung der Lauffläche erreicht. Die beiden vorangegangenen Analysen beruhen auf gleichen Parametern für die Wippe sowie gleichen Einstellungen für das CSL. Das Ankippen der gesamten Wippe in Variante 2 hat keinerlei Einfluss auf die Ruhelage der Kugel im Drehpunkt des Wippenarms, da unabhängig von der Lage des Standfußes der Wippe der Wippenarm immer so ausgerichtet wird, dass das Gesamtmoment  $M_{ges}$  im Drehpunkt Null ist. Trotzdem kommt es in Variante 1 nicht zu einer Ruhelage der Kugel im Drehpunkt. Ob die Kugel im Drehpunkt zur Ruhe kommt, hängt von mehreren Einflussgrößen und ihrem zeitgleichen Auftreten ab. Dazu zählen u.a. die Auslenkung des Wippenarms durch die Kugel, die Bewegung der Kugel, die Bewegungssteuerung des Wippenarms durch CSL, die Masse der Kugel, Haft- und Rollreibung sowie mögliche Unebenheiten in der Oberflächenbeschaffenheit der Lauffläche. Im günstigsten Fall verhindert die Bewegung des Wippenarms, hervorgerufen durch CSL, das Erreichen der Ruhelage der Kugel im Drehpunkt nicht. In allen anderen Fällen führt die Ansteuerung durch CSL dazu, dass die Kugel die Ruhelage nicht erreicht, sondern dass es zu einer periodischen Bewegung der Kugel um die Ruhelage kommt und im ungünstigsten Fall zu einem Aufschwingen des Systems, sodass die Kugel permanent zu den Wippenenden bewegt wird und es dort jeweils zu einem elastischen Stoß kommt.

## **3.6 Betrachtung der Morphologie**

Die Kombination aus Morphologie des Wippenarms und Ansteuerung durch CSL hat einen erheblichen Einfluss auf die Bewegung der Kugel. Der Vorteil einer konkaven Krümmung des Wippenarms gegenüber einer konvexen Krümmung bzw. eines geradlinigen Wippenarms soll im Folgenden verdeutlicht werden.

Betrachtet man die Wippe zunächst ohne einen zusätzlichen Umwelteinfluss wie die Kugel und ohne eine Ansteuerung der Gelenke mittels CSL, so führen die Morphologieänderungen des Wippenarms zu unterschiedlichen Gleichgewichtslagen. Bei einer konkaven Krümmung des Wippenarms handelt es sich um ein labiles Gleichgewicht, da der Massenmittelpunkt  $MMP_{Wippenarm}$  oberhalb des Drehpunkts liegt. Solange sich der  $MMP_{Wippenarm}$  senkrecht oberhalb des Drehpunkts befindet und die Kraftwirkungslinie der im  $MMP_{Wippenarm}$  angreifenden Gewichtskraft durch das Gelenk verläuft, befindet sich der Wippenarm im Gleichgewicht. Eine minimale Auslenkung aus diesem Gleichgewichtszustand bewirkt jedoch, dass er aus dieser Lage wegstreben und sie auch nicht mehr ohne zusätzlichen äußeren Einfluss einnehmen kann. Bei einer konvexen Krümmung des Wippenarms befindet sich der  $MMP_{Wippenarm}$  unterhalb des Drehpunktes, so dass er sich in einem stabilen Gleichgewicht befindet. Trotz einer Auslenkung des Wippenarms wird dieser immer wieder in seine Ausgangsposition zurückkehren. Handelt es sich um einen geradlinigen Wippenarm, so liegt der  $MMP_{Wippenarm}$  im Drehpunkt und es handelt sich um ein indifferentes Gleichgewicht. Eine Auslenkung des Wippenarms führt in diesem Fall zu einer neuen Gleichgewichtslage.

Im Folgenden wird der Einfluss der Morphologieänderungen des Wippenarms im Zusammenhang mit der Ansteuerung des Gelenks mittels CSL und dem zusätzlichen Umwelteinfluss der Kugel analysiert. Die Tabelle 3.1 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Auslenkungswinkel  $\varphi$  des Wippenarms und der Position der Kugel auf dem Wippenarm in Bezug auf die verschiedenen Wippenarmkrümmungen konkav, geradlinig und konvex. Die Abszisse beschreibt die möglichen Winkel, die der Wippenarm einnehmen kann. Die Ordinate zeigt die Positionen der Kugel auf dem Wippenarm zwischen den beiden Begrenzungen der Lauffläche. Sowohl Reibung als auch Zeit als Einflussfaktoren werden in der folgenden Betrachtung vernachlässigt.

Eine konkave Krümmung des Wippenarms führt zu einem linearen Zusammenhang zwischen Auslenkungswinkel  $\varphi$  des Wippenarms und der Position der Kugel. Ein geradliniger Wippenarm führt bzgl. der Position der Kugel zu einer Sprungfunktion. Sobald der Auslenkungswinkel des Wippenarms ungleich Null ist, befindet sich die Kugel an einem der Enden der Lauffläche. Eine konvexe Krümmung des Wippenarms führt zu einem hysteretischen Verhalten der Kugel. Die Kugel hat lediglich zwei mögliche Positionen: linkes und rechtes Ende der Lauffläche. Zum Erreichen einer der beiden Positionen muss der Auslenkungswinkel  $\varphi$  des Wippenarms deutlich ausgelenkt werden, um eine Positionsänderung der Kugel zu erreichen.

Betrachtet man die Wippe ohne weitere Umwelteinflüsse wie die Kugel, so wird der Wippenarm durch die Servoansteuerung durch CSL immer eine ausbalancierte Position erreichen. Die Form des Wippenarms (konkav, geradlinig, konvex) hat hier keinerlei Einfluss. Bringt man in das System jedoch eine zusätzliche Störgröße, zeigt sich der Einfluss der Morphologie des Wippenarms deutlich. Im Fall der konkaven Krümmung des Wippenarms ist bei einer sorgsam Parameterwahl für  $g_i$  und  $g_f$  durchaus eine ausbalancierte Position des Wippenarms durch CSL erreichbar. Eine konvexe Krümmung verhindert hingegen eine ausbalancierte Position des Wippenarms durch CSL.

Eine ausbalancierte Position des geradlinigen Wippenarms ist theoretisch mittels CSL erreichbar. Die Vielfältigkeit der physikalischen Einflussparameter der Wippe und Kugel sowie die kritische Einstellung der CSL-Parameter  $g_i$  und  $g_f$  machen eine ausbalancierte Position des Wippenarms in der Praxis jedoch unwahrscheinlich.

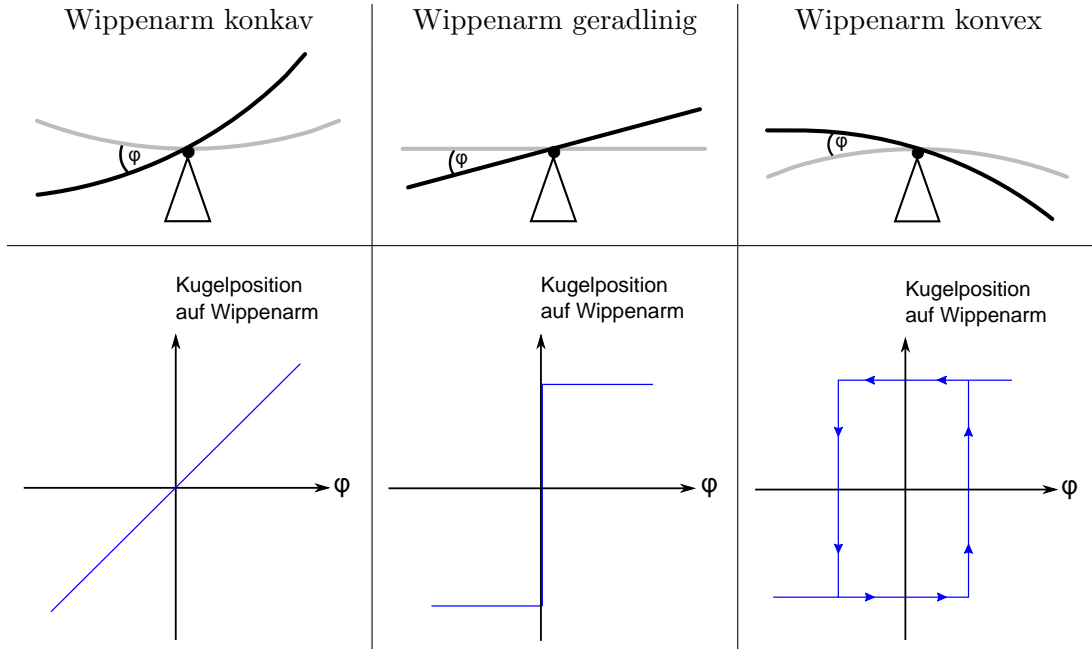


Tabelle 3.1: Die Tabelle zeigt die Position der Kugel auf dem Wippenarm in Abhängigkeit des Auslenkungswinkels  $\varphi$  bei unterschiedlichen Krümmungen des Wippenarms.



## 4 Objekt mit zwei Freiheitsgraden: Angler

In diesem Kapitel wird das Verhalten des Roboters Angler untersucht, der aus drei Segmenten mit zum Teil unterschiedlicher Größe und zwei Gelenken besteht. Weiterhin wird analysiert, welchen Einfluss die Anordnung der Segmente auf das Verhalten des Roboters hat und welche Verhaltensänderungen auftreten, wenn die Segmentanordnung verändert wird.

### 4.1 Objektbeschreibung

Der Angler ist eine Holzkonstruktion, die aus drei Segmenten besteht (vgl. Abb. 4.1). Das untere Segment, im Folgenden auch mit S1 bezeichnet, besteht aus einem waagerechten runden Standfuß, auf dem senkrecht dazu zwei gekrümmte Elemente parallel zueinander angebracht sind. Zwischen diesen beiden Elementen befindet sich der Servoantrieb, der über sein Ruderhorn mit den beiden Elementen verbunden ist.

Das mittlere Segment, im Folgenden auch mit S2 bezeichnet, hat in etwa die gleiche Länge wie das untere Segment und besteht ebenfalls aus zwei parallel zueinander angeordneten gekrümmten Elementen. Im unteren Bereich des Segments S2 ist die Aufnahme für den Servoantrieb, der über sein Ruderhorn mit dem unteren Segment S1 verbunden ist. Im oberen Bereich ist das mittlere Segment S2 mit dem Ruderhorn des zweiten Servoantriebs verbunden.

Das obere Segment, im Folgenden auch mit S3 bezeichnet, ist etwa viermal so lang wie das mittlere Segment S2. Es besteht ebenfalls aus zwei gekrümmten Elementen, die im unteren Bereich die Aufnahme für den Servoantrieb gewährleisten, der über sein Ruderhorn mit dem mittleren Segment S2 verbunden ist. Der Abstand der beiden Elemente verjüngt sich zum oberen Ende des Segments und läuft spitz zu. Bei den Servoantrieben der beiden Gelenke handelt es sich um Dynamixel RX-28 [9]. Sie sind so angeordnet, dass ihre Bewegungsrichtungen in der selben xy-Bewegungsebene liegen.

Im Folgenden wird das Gelenk zwischen Segment S1 und Segment S2 als Gelenk G1 bezeichnet und das Gelenk zwischen den Segmenten S2 und S3 analog als Gelenk G2 bezeichnet.

### 4.2 Vorbetrachtung

Der Angler wird zunächst abstrahiert und ohne zusätzliche Umwelteinflüsse betrachtet, um die Lage der Massenmittelpunkte bzgl. der beiden Gelenke G1 und G2 sowie

die Wechselwirkung der beiden Gelenke in der Bewegung zu verdeutlichen. Um die auftretenden Momente in den Gelenken G1 und G2 betrachten zu können, muss zunächst die Lage des Massenmittelpunkts  $MMP_{(1)}$  für das Gelenk G1 und die Lage des Massenmittelpunkts  $MMP_{(2)}$  für das Gelenk G2 bestimmt werden, da die Gewichtskraft im Massenmittelpunkt eines Körpers angreift.

Aufgrund der Darstellung des Anglers im Video und unter Kenntnis der Abmaße des Servoantriebs, kann auf die reale Größe der einzelnen Segmente sowie auf die Gesamtgröße rückgeschlossen werden, sodass sich in etwa eine Gesamtlänge des Objekts von ca. 77,5 cm ergibt. Die Krümmung der Segmente wurde vernachlässigt und als Form wurden Rechtecke für die Segmente S1 und S2 sowie ein Dreieck für das Segment S3 angenommen, da die Krümmung in diesem Fall lediglich geringen Einfluss auf die Verschiebung der Lage des Massenmittelpunktes hat und somit im Bezug auf die allgemeine Betrachtung der Bewegung vernachlässigt werden kann. Gleiches gilt für den Servoantrieb, der als rotationssymmetrisch angenommen wird, da zum einen keine exakte Aussage über die Abweichung seines Massenmittelpunktes von der Drehachse gemacht werden kann, zum anderen die Abweichung lediglich minimal sein dürfte und somit kaum eine Verschiebung des Massenmittelpunktes nach sich ziehen sollte.

Der Angler ist hinsichtlich der Bewegungsebene symmetrisch aufgebaut, daher wird die Masseverteilung in der dritten Dimension ebenfalls vernachlässigt. Folglich kann der Angler vereinfacht als zweidimensionales Objekt betrachtet werden, wodurch die Massenmittelpunktberechnung auf Basis der Flächenberechnung für zusammengesetzte Teilflächen durchgeführt werden kann. Zur Berechnung von  $MMP_{(1)}$  wurden zunächst die Massenmittelpunkte des mittleren und oberen Segments sowie des Servoantriebs G2 bestimmt und anschließend der Momentensatz angewendet, indem anstelle der Kräfte die Teilflächen eingesetzt wurden. Der Massenmittelpunkt  $MMP_{(2)}$  entspricht dem Massenmittelpunkt des oberen Segments S3 und wurde ebenfalls mittels Flächenberechnung ermittelt. Die Abbildung 4.2 zeigt die berechnete Lage der Massenmittelpunkte  $MMP_{(1)}$  und  $MMP_{(2)}$ .

Befindet sich der Angler im ausbalancierten Zustand wie in der Abbildung 4.2 gezeigt, so ist das Gesamtmoment  $M_{ges}$  in den Drehpunkten jeweils Null, da die Massenmittelpunkte  $MMP_{(1)}$  und  $MMP_{(2)}$  in beiden Fällen oberhalb des jeweiligen Drehpunktes liegen, die Richtung der Gewichtskraft somit entlang der Senkrechten durch die Drehachsen verläuft und daher kein Moment in den Drehpunkten wirkt. Für die Ansteuerung der Servoantriebe mittels CSL bedeutet dies, dass unter der Voraussetzung, dass  $u(t-1) = 0$  und  $\omega = 0$  gilt, kein Drehmoment im Drehpunkt durch CSL erzeugt wird.

### **Gelenk G1 aktiv, Gelenk G2 fest:**

Um die Wechselwirkung der beiden Gelenke G1 und G2 in der Bewegung zu verdeutlichen, wird der Angler zunächst in der in Abbildung 4.3, Bild a dargestellten Position betrachtet. Das mittlere Segment S2 ist um  $-45^\circ$  im Uhrzeigersinn und das obere Segment S3 um  $30^\circ$  entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt. Das Gelenk G2 sei



Abbildung 4.1: Angler

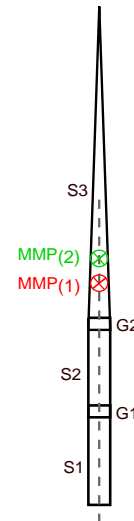


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Anglers mit eingezeichneten Massenmittelpunkten sowie Bezeichnungen der Segmente und Gelenke.

zunächst ein starres Gelenk. In Folge der Auslenkung des mittleren und oberen Segments S2 und S3 befindet sich der  $MMP_{(1)}$  rechtsseitig bzgl. der Senkrechten durch den Drehpunkt G1, sodass ein negatives Moment im Drehpunkt G1 wirkt. Ohne die Ansteuerung durch CSL würde sich das mittlere Segment S2 auf Grund der Gewichtskraft, welche im  $MMP_{(1)}$  angreift, im Uhrzeigersinn absenken. Die durch das negative Gesamtmoment  $M_{ges}$  in G1 auftretende Winkeländerung wird durch CSL erfasst und führt zu einer Änderung des Ausgangsparameters  $u(t)$ , so dass durch den Servoantrieb eine entsprechende Gegenbewegung des mittleren Segments S2 erfolgt und das Segment entgegen des Uhrzeigersinns bewegt wird. Die Endposition ist in Abbildung 4.3, Bild b dargestellt, bei der der  $MMP_{(1)}$  oberhalb des Drehpunktes von G1 liegt, die Kraftwirkungslinie somit durch die Drehachse verläuft und daher kein Moment in G1 wirkt.

#### Gelenke G1 und G2 aktiv:

Die Abbildung 4.4 zeigt die Bewegungssequenz der Segmente S1 und S2 für den Fall, dass es sich bei G2 nicht um ein starres Gelenk handelt, sondern beide Gelenke G1 und G2 mittels CSL angesteuert werden. Die Ausgangsposition der beiden Segmente S1 und S2 entspricht der im vorangegangenen Beispiel. Der  $MMP_{(1)}$  befindet sich in Folge der Auslenkung der Segmente S2 und S3 rechtsseitig bzgl. der Senkrechten durch den Drehpunkt G1, so dass ein negatives Moment im Drehpunkt G1 wirkt. Aufgrund der entsprechenden Gegenregelung mittels CSL wird das mittlere Segment S2 entgegen des Uhrzeigersinns bewegt. Das obere Segment S3 ist bezüglich der Senkrechten

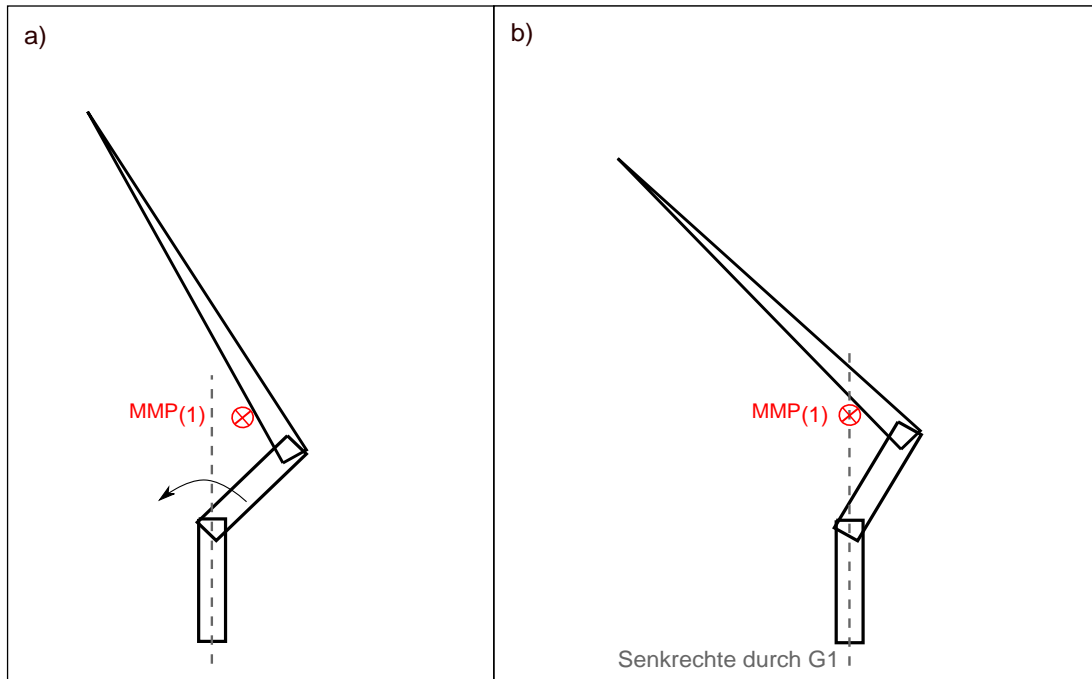


Abbildung 4.3: Bewegungssequenz des Anglers, wobei lediglich G1 mittels CSL angesteuert wird und es sich bei G2 um ein starres Gelenk handelt.

durch den Drehpunkt G2 entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt, wodurch sich der  $MMP_{(2)}$  linksseitig bzgl. der Senkrechten durch G2 befindet. Die im  $MMP_{(2)}$  angreifende Gewichtskraft bewirkt ein positives Moment im Drehpunkt G2, wodurch eine Winkeländerung in G2 auftritt. Diese wird durch CSL erfasst, der Ausgangsparameter  $u(t)$  ändert sich und das obere Segment S3 wird im Uhrzeigersinn bewegt.

Einfluss der Bewegung von S3 auf die Bewegung von S2:

Die Bewegung des oberen Segments S3 im Uhrzeigersinn hat lediglich einen sehr geringen Einfluss auf die Bewegung des mittleren Segments S2 entgegen des Uhrzeigersinns. Der Massenmittelpunkt  $MMP_{(1)}$  verschiebt sich durch die Bewegung von S3 minimal im Uhrzeigersinn auf einer Kreisbahn, wodurch der wirksame Hebelarm bzgl. G1 minimal größer wird. Gleichzeitig wird das Segment S2 entgegen des Uhrzeigersinns bewegt, sodass der wirksame Hebelarm bzgl. G1 kontinuierlich geringer wird. Solange sich der Massenmittelpunkt  $MMP_{(1)}$  rechtsseitig bzgl. der Senkrechten durch den Drehpunkt G1 befindet, wirkt ein negatives Moment im Drehpunkt G1. Die entsprechende Gegenregelung durch CSL bewirkt eine Bewegung des mittleren Segments S2 entgegen des Uhrzeigersinns.

Einfluss der Bewegung von S2 auf die Bewegung von S3:

Während der Bewegung des oberen Segments S3 im Uhrzeigersinn nähert sich das obere Segment S3 und somit der  $MMP_{(2)}$  der Senkrechten durch den Drehpunkt G2 an. Das wirksame positive Moment im Drehpunkt G2 wird kontinuierlich geringer.

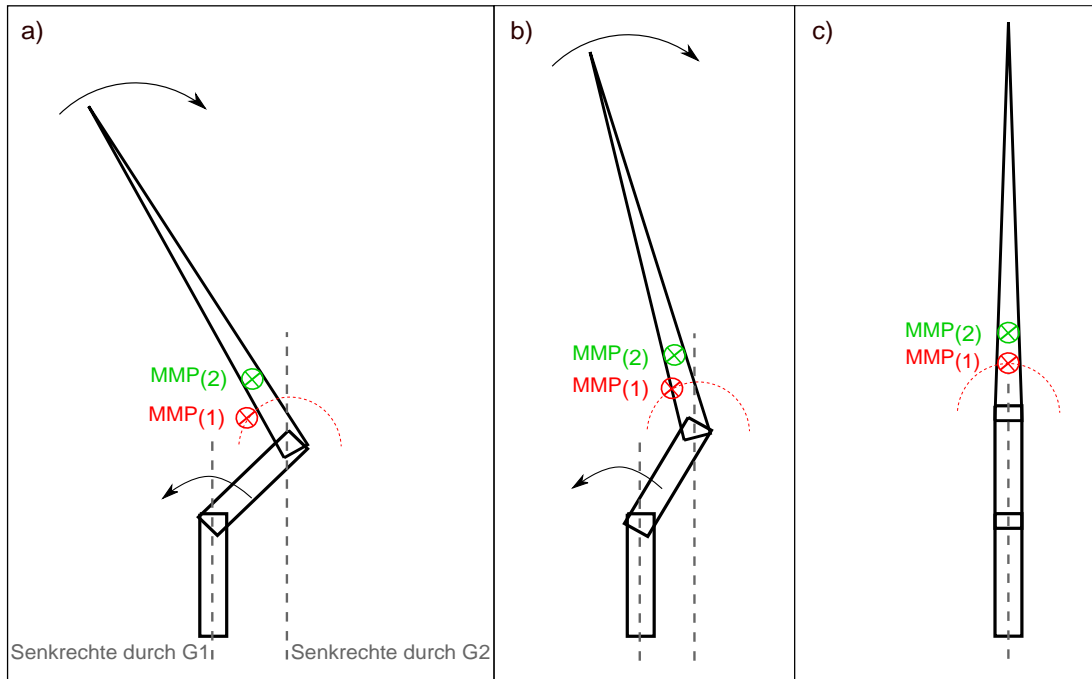


Abbildung 4.4: Bewegungssequenz des Anglers inkl. der Verschiebung der Massenmittelpunkte bei Ansteuerung beider Gelenke mittels CSL.

In Folge der Bewegung des mittleren Segments  $S_2$  entgegen des Uhrzeigersinns wird das obere Segment  $S_3$  und damit auch  $MMP_{(2)}$  immer wieder minimal entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt, wodurch das positive Moment im Drehpunkt  $G_2$  wieder etwas vergrößert wird. Die damit verbundene Winkeländerung bewirkt eine Vergrößerung des CSL-Ausgangsparameters  $u(t)$ , wodurch die Bewegung des oberen Segments  $S_3$  schneller wird.

### 4.3 Bewegungsanalyse des Anglers mit Gummiband

Für den folgenden Versuch steht der Standfuß waagrecht auf dem Boden, welcher mit Teppich ausgelegt ist. Das mittlere und obere Segment befinden sich in senkrechter Position. Die Lage der Massenmittelpunkte  $MMP_{(1)}$  und  $MMP_{(2)}$  ist identisch mit den in Kapitel 4.2 beschriebenen Positionen. An der Spitze des oberen Segments ist ein Gummiband angebracht, welches eine Zugfeder mit unbekannter Federkonstante  $D$  darstellt. Am anderen Ende des Gummibands befindet sich eine Styroporkugel, welche mit einem Klettband umwickelt ist. Das Gummiband ist mit dem Klettband verbunden.

Vereinfacht wird für das Gummiband angenommen, dass das Hooksche Gesetz gilt. Das bedeutet, dass der Betrag der Kraft, die zur Auslenkung des Gummibandes erforderlich ist, proportional zum zurückgelegten Weg ist. Der Proportionalitätsfaktor ist die Federkonstante  $D$ . Somit gilt:

$$F_{Gummiband} = D * \Delta s \quad (4.1)$$

wobei  $\Delta s$  die Änderung des Weges ist. Die Kraftwirkungslinie ergibt sich zwangsläufig aus der Strecke zwischen der Position der Klettverbindung am Teppich und der Montageposition an der Spitze des oberen Segments. Die Widerhaken des Klettbandes bilden in Kombination mit den Teppichschlaufen eine reversible Verbindung, welche aufgehoben wird, wenn eine von außen auf die Widerhaken wirkende Zugkraft  $F_{Gummiband}$  eine vom Material des Gewebes abhängige Kraft  $F_{Klett}$  überschreitet, so dass gilt:

$$F_{Klett} < F_{Gummiband} \quad (4.2)$$

Die Zugkraft  $F_{Gummiband}$  ist das Resultat aus den durch die Servoantriebe erzeugten Drehmomenten in Kombination mit dem jeweils wirksamen Hebelarm, wodurch eine Kraft  $F_{Servoantriebe}$  aufgebracht wird und auf das Gummiband übertragen wird. Es gilt:

$$F_{Gummiband} < F_{Servoantriebe} \quad (4.3)$$

In diesem Versuch sind die Servoantriebe, die mittels CSL im Contraction Mode angesteuert werden, in den Gelenken G1 und G2 bereits eingeschaltet, wobei die genauen Werte der CSL-Parameter  $g_i$  und  $g_f$  unbekannt sind. Das in den Gelenken jeweils wirksame Gesamtmoment  $M_{ges}$  ist die Summe aus zwei Einzelmomenten. Das eine Moment resultiert aus der Zugkraft  $F_{Gummiband}$ , welche in Folge der Spannung des Gummibandes auf das obere Segment wirkt, das andere Moment resultiert aus der im jeweiligen Massenmittelpunkt angreifenden Gewichtskraft.

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz a - b**

Die Styroporkugel wird vom Angler entfernt auf den Boden geworfen, so dass das Gummiband unter Spannung gesetzt wird. Daraufhin neigen sich mittleres und oberes Segment im Uhrzeigersinn. Für die Bewegungsanalyse werden beide Gelenke separat betrachtet.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz a - b**

Analyse Gelenk G2:

Als Folge der Positionierung der Styroporkugel links vom Angler werden oberes und mittleres Segment kurzzeitig minimal entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt. Durch diese Auslenkung verschiebt sich der Massenmittelpunkt  $MMP_{(2)}$  linksseitig bzgl. der Senkrechten durch den Drehpunkt und bewirkt somit ein positives Moment  $M_{MMP(2)}$  im Drehpunkt G2. Zusätzlich wirkt durch die Spannung des Gummibandes eine Zugkraft auf das obere Segment. Die Kraftwirkungslinie der Zugkraft des Gummibandes verläuft linksseitig vom Drehpunkt G2, wodurch im Gelenk G2 ein weiteres positives Moment  $M_{Gummiband}$  wirkt. Das Gesamtmoment  $M_{ges}$  ist somit positiv. Die Regelung mittels CSL erzeugt als Reaktion auf das positive Moment ein negatives Drehmoment

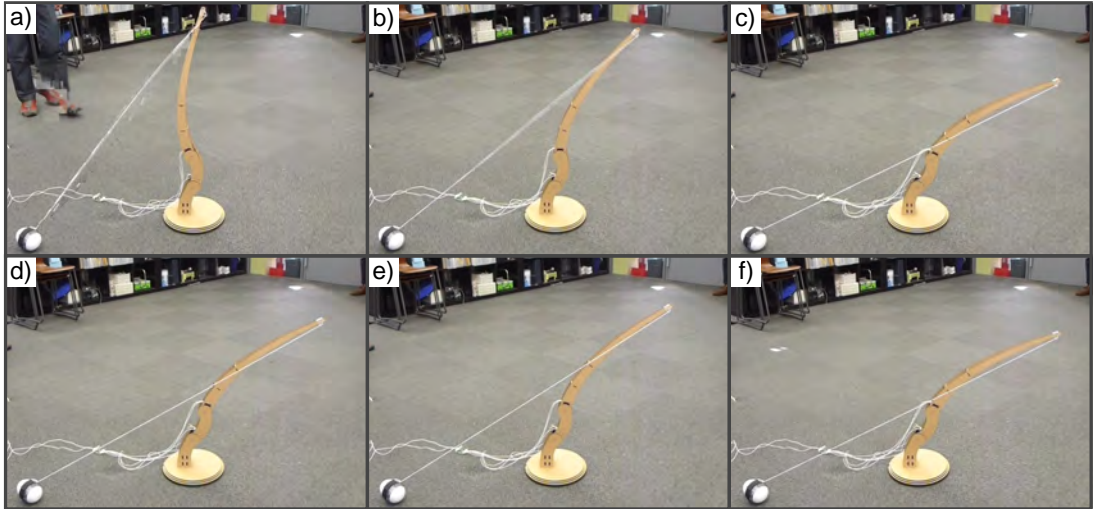


Abbildung 4.5: Bewegungssequenz des Anglers, wobei die Spitze des Anglers mit einem Gummiband verbunden ist, welches wiederum mittels eines Klettbandes am Boden befestigt ist. Durch die Spannung des Gummibandes wird eine Kraft auf den Angler übertragen, somit in den Gelenken ein Moment erzeugt und in Folge der Winkeländerung eine Gegenreaktion durch CSL ausgelöst. Die Bewegung des Anglers führt nicht zur Lösung des Klettbandes vom Boden.

mittels des Servoantriebs, wodurch sich das obere Segment im Uhrzeigersinn bewegt. Während der Bewegung gilt:

$$M_{Gummiband} + M_{MMP(2)} < M_{CSL} \quad (4.4)$$

Das Moment  $M_{MMP(2)}$ , welches durch die Gewichtskraft des oberen Segments verursacht wird, nimmt während der Bewegung im Uhrzeigersinn kontinuierlich ab und erreicht, wenn der Massenmittelpunkt bzgl. der Senkrechten oberhalb von G2 liegt, einen Wert von Null. Anschließend steigt der Betrag wieder an, wobei das Moment nun negativ ist, da sich der Massenmittelpunkt rechts vom Drehpunkt G2 befindet. Ab dieser Position überlagert sich das positive Moment  $M_{Gummiband}$  mit dem nun negativen Moment  $M_{MMP(2)}$ .

Während der Bewegung des oberen Segments im Uhrzeigersinn verändert sich das Gesamtmoment  $M_{ges}$  im Drehpunkt G2 kontinuierlich. Bei dieser Bewegung nimmt die durch das Gummiband auf das obere Segment übertragene Kraft mit steigendem Winkel und damit steigendem Weg  $s$  zu. Gleichzeitig nimmt der Betrag des Moments  $M_{Gummiband}$  ab, da sich der rechtwinklig zur Kraftwirkungslinie und durch das Gelenk G2 verlaufende wirksame Hebelarm verringert, d.h. die Kraftwirkungslinie nähert sich immer mehr dem Drehpunkt des Gelenks G2 an. Während das positiv wirkende Moment im Drehpunkt G2 mit der Bewegung im Uhrzeigersinn geringer wird, vergrößert sich gleichzeitig das negativ wirkende Moment  $M_{MMP(2)}$  in G2, hervorgerufen durch die Gewichtskraft des oberen Segments, da sich der wirksame Hebelarm vergrößert.

Analyse Gelenk G1:

Die Betrachtung für das Gelenk G1 erfolgt analog zu G2. Da die Kraftwirkungslinie des Gummibandes zu Beginn des Versuchs ebenfalls nicht durch das Gelenk G1 verläuft, tritt auch hier als Folge der Zugkraft ein positives Moment  $M_{Gummiband}$  auf. Zu diesem Moment addiert sich noch das positive Moment  $M_{MMP(1)}$ , welches als Folge der Auslenkung des mittleren und oberen Segment und somit des Massenmittelpunkts  $MMP(1)$  aus der senkrechten Position des Anglers zunimmt. Das positive Gesamtmoment  $M_{ges}$  in G1 hat eine Drehbewegung im Uhrzeigersinn des Servoantriebs, verursacht durch CSL, zur Folge, so dass sich oberes und mittleres Segment im Uhrzeigersinn bewegen.

Aufgrund der Auslenkung der Segmente im Uhrzeigersinn befindet sich der Massenmittelpunkt  $MMP(1)$  rechts bzgl. der Senkrechten durch den Drehpunkt des Gelenks G1 und erzeugt somit ein negatives Moment am Drehpunkt. Dieses negative Moment ist jedoch kleiner als das positive Moment, welches durch die Zugkraft des Gummibands  $M_{Gummiband}$  eingebracht wird, wodurch das Gesamtmoment  $M_{ges}$  am Drehpunkt weiterhin positiv ist und eine entgegengesetzte Auslenkung der Segmente durch CSL erfolgt. Eine Änderung der Drehrichtung erfolgt unter den gleichen Bedingungen wie bei Gelenk G2.

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz c - d**

Das mittlere und obere Segment sind beide im Uhrzeigersinn ausgelenkt und das Klettband der Styroporkugel haftet noch immer am Teppichboden, d.h.  $F_{Gummiband} < F_{Klett}$ . Ab der in Bild c dargestellten Position der Segmente kehrt sich die Bewegungsrichtung der beiden Segmente nun jedoch um, so dass sich beide Segmente in positiver Richtung, d.h. entgegen dem Uhrzeigersinn bewegen. Die Bewegung des mittleren Segments S2 ist deutlich zu erkennen, wohingegen die des oberen Segments S3 kaum sichtbar ist.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz c - d**

Analyse Gelenk G2:

Wenn die Kraftwirkungslinie durch den Drehpunkt führt, wirkt zwar die maximal mögliche Zugkraft als Folge der maximal möglichen Streckung des Gummibandes  $\Delta s$ , der wirksame Hebelarm und damit das Moment  $M_{Gummiband}$ , welches im Drehpunkt G2 wirkt, ist jedoch Null. Bei der Weiterführung der Bewegung im Uhrzeigersinn nimmt die Federkraft zwar wieder ab, der wirksame Hebelarm erreicht jedoch Werte größer Null und damit wirkt ein negatives Moment  $M_{Gummiband}$  in G2. Anmerkung:  $M_{Gummiband}$  erreicht nicht exakt bei Überlagerung von Kraftwirkungslinie und G2 einen Wert von Null, sondern zu dem Zeitpunkt, bei dem sich das Moment  $M_{Gummiband}$  und  $M_{MMP(2)}$  gegenseitig aufheben. Dieser Punkt liegt schätzungsweise knapp oberhalb der Überlagerung. Die Bewegung kommt zum Erliegen und kehrt sich um, wenn die Summe aus  $M_{Gummiband}$  und  $M_{MMP(2)}$  kleiner Null ist und damit ein negatives Gesamtmoment  $M_{ges}$  wirkt.



Analyse Gelenk G1:

Aufgrund der Kameraperspektive ist nicht eindeutig zu erkennen, ob auch hier die Kraftwirkungslinie des Gummibandes durch den Drehpunkt G1 führt oder oberhalb verläuft. Wahrscheinlich nähert sich die Kraftwirkungslinie dem Drehpunkt G1 nur an, was jedoch ebenfalls zu einer Umkehrung der Bewegungsrichtung entgegen dem Uhrzeigersinn führt. Die Annäherung der Kraftwirkungslinie des Gummibandes bewirkt eine Verkleinerung des positiven Moments  $M_{Gummiband}$ , welches im Drehpunkt G1 wirkt, da der wirksame Hebelarm sehr klein wird. Zusätzlich wirkt durch die im  $MMP_{(1)}$  angreifende Gewichtskraft ein negatives Moment  $M_{MMP(1)}$  im Drehpunkt G1. Das Moment  $M_{MMP(1)}$  ist größer als das Moment  $M_{Gummiband}$ , so dass das Gesamtmoment  $M_{ges}$  in G1 negativ ist. Die entsprechende Gegenregelung des CSL bewirkt eine Bewegung des mittleren Segments entgegen des Uhrzeigersinns.

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz e - f**

Mittleres und oberes Segment sind beide im Uhrzeigersinn ausgelenkt. Die Bewegungsrichtung beider Segmente kehrt sich ab der in Bild e dargestellten Position der Segmente erneut um, so dass sich beide im Uhrzeigersinn bewegen. Das Klettband der Styroporkugel haftet weiterhin am Teppichboden.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz e - f**

Analyse Gelenk G2:

Die Änderung der Bewegungsrichtung resultiert aus der Änderung des Gesamtmoments  $M_{ges}$ , welches sich aus dem Moment  $M_{MMP(2)}$  und dem Moment  $M_{Gummiband}$  zusammensetzt.

In der in Bild e abgebildeten Position des oberen Segments wirkt ein negatives Moment  $M_{MMP(2)}$  durch die Gewichtskraft des Segments. Allerdings ist dieses Moment kleiner als das durch die Gewichtskraft eingebrachte Moment in Bild d da die bisherige Bewegung des oberen Segments entgegen dem Uhrzeigersinn und der damit verbundenen Verschiebung des Massenmittelpunktes zu einer Verkleinerung des wirksamen Hebelarms und somit zu einem kleiner werdenden negativen Moment  $M_{MMP(2)}$  führt.

Gleichzeitig wirkt ein positives Moment  $M_{Gummiband}$  im Drehpunkt G2, da die Kraftwirkungslinie der Zugkraft des Gummibandes linksseitig vom Drehpunkt G2 verläuft. Dieses positive Moment ist während der Bewegung des oberen Segments entgegen dem Uhrzeigersinn kontinuierlich größer geworden, da der wirksame Hebelarm größer wurde.

In der in Bild e dargestellten Position ist das durch die Gewichtskraft des oberen Segments eingebrachte negative Moment  $M_{MMP(2)}$  kleiner als das positive Moment  $M_{Gummiband}$ , das durch das Gummiband eingebracht wird, wodurch das Gesamtmoment  $M_{ges}$  positiv wird und sich das obere Segment entgegen des Uhrzeigersinns bewegen würde.

Die bisherige Bewegungsrichtung entgegen dem Uhrzeigersinn, welche durch das CSL hervorgerufen wurde und das nun anliegende positive Moment in G2 bewirken eine größere Winkeländerung entgegen dem Uhrzeigersinn. Diese wird durch CSL erfasst und es erfolgt eine entsprechende Gegenregelung, so dass sich die Bewegungsrichtung umkehrt und das obere Segment wieder im Uhrzeigersinn bewegt wird bis es die in Bild f dargestellte Position erreicht.

Analyse Gelenk G1:

Die Ursache für die Änderung der Bewegungsrichtung des mittleren Segments entspricht der bereits im vorangegangenen Abschnitt für das Gelenk G2 beschriebenen Ursachen für das obere Segment. Der Massenmittelpunkt bzgl. des Gelenks G1 befindet sich rechtsseitig vom Drehpunkt, so dass in G1 ein negatives Moment  $M_{MMP(1)}$  wirkt. Gleichzeitig bewirkt die Position der Kraftwirkungslinie der Zugkraft des Gummibandes ein positives Moment  $M_{Gummiband}$  in G1.

Befinden sich oberes und mittleres Segment in der in Bild e dargestellten Position, ist das positive Moment  $M_{Gummiband}$  größer als das negative Moment  $M_{MMP(1)}$ , so dass das Gesamtmoment  $M_{ges}$  positiv ist. Analog zu der in dem vorangegangenen Abschnitt erläuterten Erfassung der Winkeländerung erfolgt auch hier eine Gegenregelung durch CSL, so dass das mittlere Segment erneut durch den Servoantrieb in G1 im Uhrzeigersinn bewegt wird. Die Bewegung des mittleren Segments im Uhrzeigersinn erfolgt bis zu der in Bild f dargestellten Position.

Weiterer Bewegungsverlauf:

Die Position des mittleren und oberen Segments in Bild f entspricht der Position in Bild c und auch der weitere Bewegungsablauf verläuft analog zu dem in Abschnitt Bild c-d beschriebenen. Im Folgenden wiederholt sich die Bewegung im bzw. entgegen des Uhrzeigersinns entsprechend der Bilder c bis e solange, bis der Versuch abgebrochen wird. Während des gesamten Versuchs konnte die Verbindung zwischen Klettband und Teppich nicht aufgehoben werden.

#### 4.4 Bewegungsanalyse des Anglers mit unelastischem Seil

Für den folgenden Versuch wurde das Gummiband durch ein nicht elastisches Seil mit gleicher Länge ersetzt. Die Morphologie des Anglers ist identisch zum vorangegangenen Versuch. Die mittels CSL im Contraction Mode gesteuerten Servoantriebe in den Gelenken G1 und G2 sind bereits eingeschaltet, wobei die exakten Werte der CSL-Parameter  $g_i$  und  $g_f$  nicht bekannt sind.

##### Bewegungsbeschreibung Bildsequenz a - c

Die Styroporkugel wird vom Angler entfernt auf den Boden geworfen, so dass das Seil eine Zugkraft auf die Spitze des oberen Segments S3 überträgt. Mittleres und oberes Segment bewegen sich daraufhin entgegen des Uhrzeigersinns, wodurch die Styroporkugel vom Boden gelöst wird und in Richtung der ausgelenkten Segmente gezogen

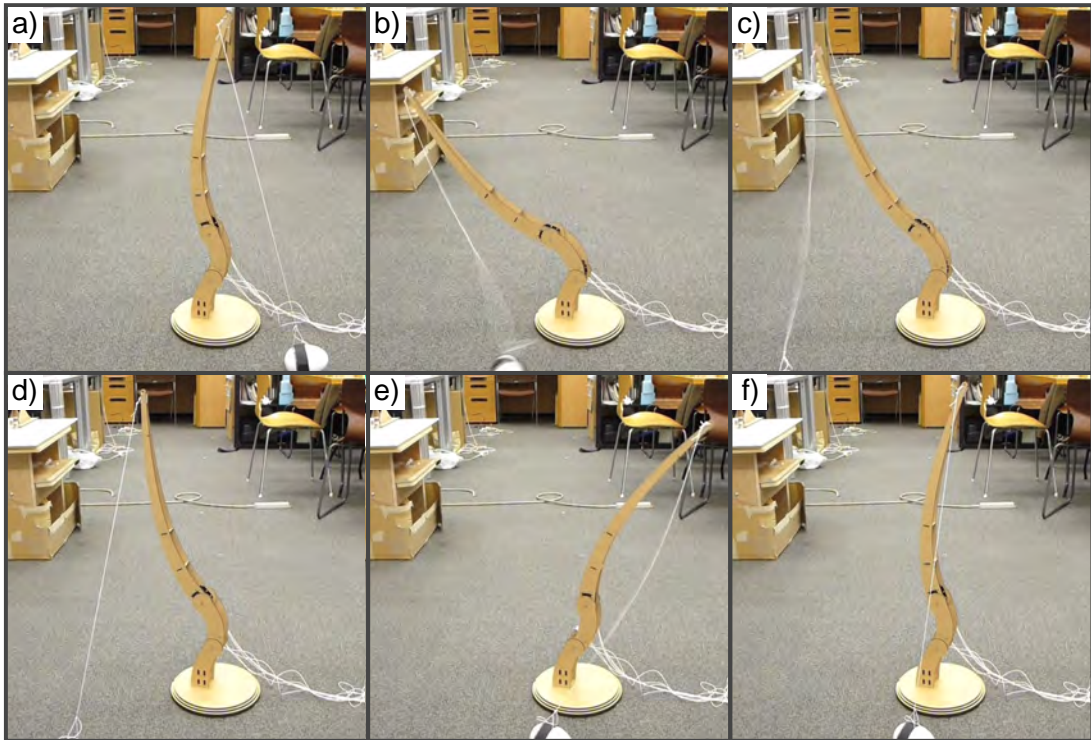


Abbildung 4.6: Die Spitze des Anglers ist während dieser Bewegungssequenz mit einem Seil verbunden, das wiederum mittels eines Klettbandes am Boden befestigt ist. Durch die Spannung des Seils wird eine Kraft auf den Angler übertragen, in den Gelenken ein Moment erzeugt und in Folge der Winkeländerung eine Gegenreaktion durch CSL ausgelöst. Diese führt zur Lösung der Verbindung zwischen Klettband und Boden.

wird. Die Kugel rollt über den Boden und bleibt anschließend liegen, so dass das Seil nicht mehr gespannt ist. Während die Styroporkugel vom Boden abgehoben wird, werden die Segmente S2 und S3 stark entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt. Sobald die Kugel auf dem Boden rollt und das Seil nicht mehr unter Spannung steht, beginnen mittleres und oberes Segment sich einer senkrechten Position zu nähern.

#### Funktionsbeschreibung Bildsequenz a - c

In Folge der Haftung des Klettbandes am Teppichboden steht das Seil unter Spannung, wodurch auf oberes und mittleres Segment eine Kraft  $F_{Seil}$  entlang des Seils in Richtung Boden übertragen wird und in den Drehpunkten G1 und G2 ein negatives Moment auftritt. Die damit einhergehende Winkeländerung wird durch CSL erfasst und der Ausgangsparameter  $u(t)$  ändert sich, so dass ein entsprechendes Gegenmoment am jeweiligen Servoantrieb erzeugt wird und die Segmente S2 und S3 entgegen des Uhrzeigersinns bewegt werden. Durch die Auslenkung der beiden Segmente S2 und S3 wirkt über das Seil eine Zugkraft  $F_{Servoantriebe}$  auf die Klettverbindung. Der Betrag der Kraft  $F_{Servoantriebe}$  wirkt vollständig auf die Verbindung, da im Gegensatz zum

Gummiband keine Kraft zur Auslenkung aufgewendet werden muss. Es gilt:

$$F_{Seil} = F_{Servoantriebe} \quad (4.5)$$

Die Verbindung zwischen Klettband und Teppichboden wird gelöst, wenn gilt:

$$F_{Klett} < F_{Seil} \quad (4.6)$$

Unmittelbar nachdem die Klettverbindung zw. Styroporkugel und Teppichboden gelöst wird, werden mittleres und oberes Segment kurzzeitig stark entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt, da zum einen das Seil nicht mehr gespannt ist und somit keine Zugkraft auf die Segmente S2 und S3 wirkt, zum anderen zum Lösen der Verbindung zuvor große Drehmomente durch die Servoantriebe aufgebracht wurden. Die Auslenkung der Segmente S2 und S3 entgegen des Uhrzeigersinns führt zu einer großen Winkeländerung in kurzer Zeit, was zu einer Änderung des Ausgangsparameters  $u(t)$  führt und die Segmente S2 und S3 im Uhrzeigersinn bewegt werden.

Zusätzlich tritt in den jeweiligen Drehpunkten G1 und G2 ein positives Moment auf, da beide Segmente S2 und S3 entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt sind und somit die Gewichtskraft in den Massenmittelpunkten  $MMP_{(1)}$  und  $MMP_{(2)}$  wirkt. Zu diesem Zeitpunkt der Bewegungsabfolge hat das Seil bzw. die Styroporkugel keinen Einfluss, da das Seil nicht gespannt ist, damit auch keine Kraft auf die Segmente wirkt und folglich dadurch auch keine Momente in den Drehpunkten auftreten.

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz d - f**

Mittleres und oberes Segment bewegen sich im Uhrzeigersinn und spannen das Seil erneut. Beide Segmente bewegen sich über die Senkrechte hinaus und die Styroporkugel wird daraufhin vom Boden gelöst. Die Segmente werden durch die Ablösung der Styroporkugel kurzzeitig im Uhrzeigersinn ausgelenkt und richten sich anschließend entgegen des Uhrzeigersinns in die Senkrechte auf. Die Styroporkugel bleibt im rechten Winkel zur Bewegungsebene des Anglers direkt vor dem Standfuß liegen, wobei nicht deutlich zu erkennen ist, ob das Seil gespannt ist oder nicht.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz d - f**

Durch die mittels CSL hervorgerufene Bewegung des mittleren und oberen Segments im Uhrzeigersinn wird das Seil erneut gespannt (vgl. Bild d). Die daraus resultierende Zugspannung auf die Segmente S2 und S3 hat eine Vergrößerung der CSL-Ausgangsparameter  $u(t)$  für die Servoantriebe in den Gelenken G1 und G2 zur Folge, wodurch die Segmente weiterhin im Uhrzeigersinn ausgelenkt werden. In Folge der Auslenkung der beiden Segmente wird die Zugkraft, die über das Seil auf die Klettverbindung wirkt, groß genug, um die Verbindung zwischen den Widerhaken des Klettbandes und den Teppichschlaufen aufzuheben, so dass die Bedingung 4.6 erfüllt ist.

Wenn die Klettverbindung zwischen Styroporkugel und Teppichboden gelöst wird, werden oberes und mittleres Segment kurzzeitig verstärkt im Uhrzeigersinn ausgelenkt.

Der Grund hierfür ist zum einen der plötzliche Wegfall der Zugkraft durch das Seil auf die Segmente S2 und S3, zum anderen das große Moment, das über den Servoantrieb zum Lösen der Verbindung aufgebracht wurde. Die daraus resultierende große Winkeländerung innerhalb kurzer Zeit wird mittels CSL erfasst und führt zu einer Änderung des Ausgangsparameters  $u(t)$  und somit zu einer Änderung der Bewegungsrichtung der Segmente S2 und S3 im Uhrzeigersinn.

Da das Seil nicht mehr unter Spannung steht und daher auch keine Zugkraft auf die Segmente S2 und S3 ausgeübt wird, wirkt in den Drehpunkten G1 und G2 auch kein Moment. Die in den Massenmittelpunkten  $MMP_{(1)}$  und  $MMP_{(2)}$  angreifende Gewichtskraft bewirkt allerdings in den Gelenken G1 und G2 ein negatives Moment, wodurch sich der CSL-Ausgangsparameters  $u(t)$  ändert und die Segmente entgegen des Uhrzeigersinns bewegt werden (vgl. Bild e).

Die Styroporkugel findet ihre Ruhelage vor dem Standfuß rechtwinklig zur Bewegungsebene. Unabhängig davon, ob eine Zugkraft über das Seil auf die beiden Segmente übertragen wird oder nicht, wirkt kein Moment in den Gelenken G1 und G2, da eine eventuell auftretende Kraft senkrecht zur Bewegungsebene wirken würde. Lediglich Kräfte, die in der Bewegungsebene des Anglers auftreten, bewirken ein Moment und damit eine Reaktion durch CSL.

Da jedoch durch das Seil kein Moment in den Gelenken G1 und G2 erzeugt wird, nehmen die Segmente S2 und S3 eine ausbalancierte Position ein und der Versuch ist beendet.

## 4.5 Zusammenfassung

Aufgrund der CSL-Ansteuerung der Servoantriebe werden oberes und mittleres Segment immer in entgegengesetzter Richtung zur einwirkenden Kraft bewegt. Befindet sich der Angler frei im Raum und es wirken, abgesehen von der in den Massenmittelpunkten  $MMP_{(1)}$  und  $MMP_{(2)}$  wirkenden Gewichtskraft, keine zusätzlichen Kräfte auf ihn, so wird er immer eine ausbalancierte Position einnehmen (vgl. Kapitel 4.2).

In Kapitel 4.3 wurde eine mit Klettband umwickelte Styroporkugel am oberen Segment des Anglers mittels eines Gummibandes befestigt. Wie bereits eingangs erwähnt, bilden die Widerhaken des Klettbandes in Kombination mit den Teppichschlaufen eine reversible Verbindung, die nur dann aufgehoben wird, wenn in Folge einer einwirkenden Zugkraft eine vom Material des Gewebes abhängige Grenze überschritten wird und die Bedingung 4.2 gilt.

Die Verbindung zwischen Klettband und Teppich wurde in Variante 1 nicht aufgehoben, da die Bedingung 4.2 zum Lösen der Verbindung nicht erfüllt wurde. In Folge der Federkonstanten  $D \ll \infty$  wird immer ein Teil der durch die Servoantriebe aufbrachten Kraft für die Längenausdehnung des Gummibands benötigt. Somit steht die Kraft  $F_{Servoantriebe}$  nicht vollständig zur Erfüllung der o.g. Bedingung zur Verfügung. Um

die Verbindung dennoch zu lösen, kann die Kraft  $F_{Klett}$  verringert werden, in dem die Wahl der Materialien für die Widerhaken und die Teppichschlaufen modifiziert wird, so dass die Verbindung leichter lösbar ist. Eine weitere Möglichkeit besteht zum einen in der Erhöhung der Federkonstanten und damit zur Verringerung des erforderlichen Weges, zum anderen in der Erhöhung des zur Verfügung stehenden Auslenkungsweges durch den Angler. Die genannten Maßnahmen haben zum Ziel, dass die Kraft  $F_{Klett}$  überschritten wird. Wie der in Kapitel 4.4 beschriebene Versuch gezeigt hat, wird bei einer Erhöhung der Federkonstanten durch Verwendung eines unelastischen Seils anstelle eines Gummibandes die Verbindung zwischen Klettband und Teppich aufgehoben. (Anmerkung: Nicht das vom Servoantrieb eingebrachte Moment ist die limitierende Größe, sondern die maximal möglichen Längenänderung des Gummibands durch den Angler.)

Unabhängig davon, ob es sich um ein Gummiband oder ein nicht elastisches Seil handelt, kann der Angler unter Einwirkung dieser Einflussgröße vier unterschiedliche Verhalten aufweisen. Erstens kann die Klettverbindung gelöst werden, da die durch die Servoantriebe aufgebrachte Kraft größer als die zum Lösen der Verbindung benötigte Kraft ist, so dass die Bedingungen 4.2 bzw. 4.6 erfüllt sind. Zweitens kann es zu einer periodischen Bewegung, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, kommen, bei der die Klettverbindung nicht gelöst wird. Dabei kommt es zu einer periodischen Richtungsumkehr des durch die Einflussgröße eingebrachten Moments auf die Gelenke G1 und G2, worauf CSL mit einem jeweils entsprechenden Gegenmoment reagiert. Im dritten Fall wird die Klettverbindung ebenfalls nicht gelöst. Die Bewegung der Segmente S2 und S3 in entgegengesetzter Richtung zur einwirkenden Kraft  $F_{Klett}$  stoppt, da das durch die Servoantriebe eingebrachte maximale Moment nicht ausreicht, um die Klettverbindung zu lösen. Der vierte und letzte Fall entspricht dem ausbalancierten Zustand des Anglers. Die Styroporkugel ist entweder so positioniert, dass das Gummiband/unelastische Seil nicht gespannt ist und somit weder Kraft noch Momente auf die Gelenke G1 und G2 übertragen werden oder das Gummiband/unelastische Seil ist zwar gespannt, es treten jedoch keine Momente in G1 und G2 auf, da die Kraftwirkungslinie senkrecht zur Bewegungsebene liegt. Es wirkt somit lediglich die Gewichtskraft in den Massenmittelpunkten  $MMP_{(1)}$  und  $MMP_{(2)}$ .

## 4.6 Betrachtung der Morphologie

In der folgenden Betrachtung werden verschiedene Anordnungen der Segmente des Anglers auf dessen Bewegung mit und ohne Seil bzw. Gummiband als Umwelteinfluss analysiert. Dabei werden sowohl der Einfluss der Morphologievarianten auf die Lageänderungen der Massenmittelpunkte als auch die resultierenden Kräfte und dabei wirksamen Hebelarme aufgezeigt.

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Morphologie wurde die Anordnung der Segmente verändert. Die Abbildungen 4.7, 4.8 und 4.9 zeigen drei unterschiedliche Segmentanordnungen des Anglers inkl. der Lageänderung des  $MMP_{(1)}$  bei einem Winkel zwischen dem mittleren Segment S2 und dem oberen Segment S3 von  $180^\circ$ ,  $135^\circ$  und

90°. Die Gesamtgröße des Anglers bleibt in allen drei Varianten erhalten. Variante 1 entspricht der bereits bekannten Morphologie, bei der die Segmente S1 und S2 gleich lang sind, das Segment S3 jedoch viermal so lang wie S1 bzw. S2 ist. In Variante 2 ist das mittlere Segment S2 viermal so lang wie die Segmente S1 und S3 und in Variante 3 ist das untere Segment S1 viermal so lang wie die Segmente S2 und S3.

Zunächst wurde für alle drei Morphologievarianten der Massenmittelpunkt  $MMP_{(1)}$  bzgl. G1 berechnet. Die Berechnung wurde, wie in Kapitel 4.2 erläutert, mittels Flächenberechnung vorgenommen, wobei die Verschiebung des Massenmittelpunkts bei verschiedenen Auslenkungen der Segmente S2 und S3 mittels einer Rotationsmatrix berechnet wurde. Die Abbildungen 4.10, 4.11 und 4.12 zeigen die Lage des MMPs bzgl. G1 bei den drei unterschiedlichen Morphologien mit verschiedenen Auslenkungen des mittleren und oberen Segments. Der Ursprung des Koordinatensystems wurde in das Gelenk G1 gelegt. Das untere Segment inkl. Standfuß wurde bei der Betrachtung vernachlässigt, da es irrelevant für die Lage des Massenmittelpunkts bzgl. G1 ist.

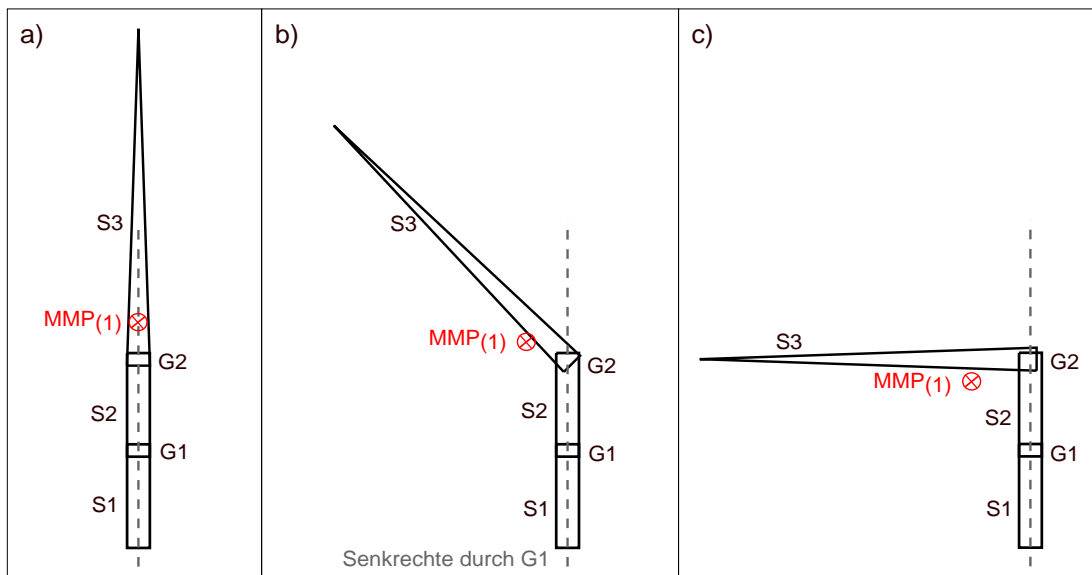


Abbildung 4.7: Die Grafik zeigt die Morphologievariante 1 des Anglers, bei der S1 und S2 gleich lang sind und S3 viermal so lang wie S1 bzw. S2 ist. Die Einzelbilder a, b und c zeigen die Verschiebung des  $MMP_{(1)}$  bei einem Winkel zwischen S2 und S3 von 180°, 135° und 90°.

#### 4.6.1 Abstand des $MMP_{(1)}$ zum Drehpunkt des Gelenks G1

Die in den Diagrammen 4.10, 4.11 und 4.12 in blau dargestellte Kurve zeigt die Verschiebung des Massenmittelpunkts für den Fall der Auslenkung des Gelenks G1 in Schritten von  $\pm 15^\circ$ , wobei das obere Segment S3 bzgl. dem mittleren Segment S2 keine Auslenkung erfährt, d.h. der Winkel zwischen S2 und S3 beträgt 180°. Vergleicht

man die Lage des  $MMP_{(1)}$  bzgl. der Entfernung zum Gelenk G1, so ist deutlich zu erkennen, dass der Massenmittelpunkt in Variante 2 bei einer Auslenkung von  $0^\circ$  mit 31,79 cm am weitesten entfernt vom Drehpunkt liegt. Den kürzesten Abstand zwischen  $MMP_{(1)}$  und Drehpunkt weist Variante 3 mit 12,5 cm bei einer Auslenkung von  $0^\circ$  auf. Vergleicht man die drei Morphologievarianten unter der Annahme gleicher Auslenkung der Segmente S2 und S3 aus der Senkrechten, so ist der Abstand zwischen  $MMP_{(1)}$  und Drehpunkt G1 in Variante 2 immer größer als in Variante 1 und dieser immer größer als in Variante 3. Je größer der Abstand zwischen  $MMP_{(1)}$  und Drehpunkt G1 ist, umso größer ist das in G1 potentiell wirkende Moment, da sich das Moment aus dem Produkt von Kraft und wirksamem Hebelarm berechnet, wobei hier die Kraft die im  $MMP_{(1)}$  angreifende Gewichtskraft ist.

Die Entfernung zwischen Massenmittelpunkt und Drehpunkt G1 und somit das im Drehpunkt G1 auftretende Moment hat Einfluss auf den CSL-Ausgangsparameter  $u(t)$ . In Folge des größeren Moments wird der CSL-Ausgangsparameter  $u(t)$  ebenfalls größer, was wiederum zu einer schnelleren Bewegung der Segmente führt (vgl. [10], S. 36 f.). Die durch den Servoantrieb in G1 hervorgerufene schnelle Bewegung der Segmente S2 und S3 führt zu einer schnellen Änderung der Lage des Massenmittelpunkts  $MMP_{(2)}$  für das Gelenk G2, d.h. auch im Gelenk G2 erfolgt eine Gegenregelung mittels CSL, die wiederum den  $MMP_{(1)}$  beeinflusst. Die wechselseitige Beeinflussung kann im Extremfall dazu führen, dass die Segmente nicht in der ausbalancierten Position zu Ruhe kommen.

#### 4.6.2 Einfluss der Auslenkung des oberen Segments auf die Verschiebung des $MMP_{(1)}$

Die in rot dargestellte Kurve der Abbildungen 4.10, 4.11 und 4.12 zeigt die Verschiebung des Massenmittelpunkts  $MMP_{(1)}$  für den Fall der Auslenkung des Gelenks G1 in Schritten von  $+/- 15^\circ$ , wobei ein Winkel von  $135^\circ$  zwischen S2 und S3 permanent beibehalten wird. Die in grün dargestellte Kurve verdeutlicht die Verschiebung des  $MMP_{(1)}$  für einen Winkel zwischen S2 und S3 von konstant  $90^\circ$ , während das mittlere Segment in Schritten von  $+/- 15^\circ$  ausgelenkt wird.

Eine Auslenkung des oberen Segments S3 hat in der Morphologievariante 1 einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Verschiebung des  $MMP_{(1)}$  im Vergleich zu Variante 2 und 3. Wird beispielsweise das obere Segment um  $90^\circ$  aus der Senkrechten ausgelenkt und das mittlere Segment verbleibt in einer nicht ausgelenkten Position von  $0^\circ$ , so verkürzt sich der Abstand des  $MMP_{(1)}$  zum Gelenk G1. Gleichzeitig vergrößert sich der Abstand des  $MMP_{(1)}$  zur Senkrechten durch G1. Damit tritt bereits in senkrechter Position von Segment S2 ein Moment in G1 auf. Die Änderung aus der Verschiebung des  $MMP_{(1)}$  bewirkt in Variante 1 eine große Änderung des Moments in G1, für Variante 2 und 3 sind die Änderungen des Moments deutlich geringer. Zur Neutralisierung des durch die Winkeländerung von S3 hervorgerufenen Moments im Gelenk G1 muss in Variante 1 das mittlere Segment S2 um  $-40,9^\circ$  ausgelenkt werden, in Variante 2 um  $-3,5^\circ$  und in Variante 3 um  $-14,9^\circ$  (vgl. grüne Kurve der Abbildungen 4.10, 4.11, 4.12).



Ausschlaggebend für die Stärke des Einflusses der Auslenkung des oberen Segments auf die Verschiebung des  $MMP_{(1)}$  ist die Lage des  $MMP_{(1)}$  in Bezug zum Gelenk G2. In Variante 1 liegt der  $MMP_{(1)}$  oberhalb des Drehpunkts G2, während er in Variante 3 im Gelenk G2 und in Variante 2 unterhalb des Gelenks G2 liegt (vgl. Abbildungen 4.7, 4.8 und 4.9, Bild a).

### 4.6.3 Einfluss der Segmentanordnung auf die Kraftübertragung zum Lösen der Klettverbindung

Aufgrund der unterschiedlichen Segmentanordnung bei den drei Morphologievarianten ergibt sich eine unterschiedliche Gesamtlänge aus der Summe der Längen der Segmente S2 und S3. Die Varianten 1 und 2 weisen die gleiche Gesamtlänge auf, da beide Varianten jeweils aus einem kurzen und einem langen Segment bestehen. Bei Variante 3 handelt es sich bei S2 und S3 jeweils um ein kurzes Segment, so dass die Gesamtlänge im Verhältnis zu Variante 1 und 2 kleiner ist.

Im Vergleich der drei Morphologievarianten zeigt sich bei gleicher Auslenkung der Segmente S2 und S3 sowie der selben Randbedingungen, d.h. unter Verwendung der selben Styroporkugel, des selben Seils/Gummibandes und der gleichen Lage der Styroporkugel zum Angler, für Variante 1 und 2 aufgrund der größeren Gesamtlänge der Segmente S2 und S3 ein größerer Hebelarm bzgl. des Drehpunktes G1 als für Variante 3.

Geht man von einem konstanten Drehmoment aus, welches durch die jeweiligen Servoantriebe erzeugt wird, so ist die Kraft, die auf ein Seil/Gummiband übertragen wird, umgekehrt proportional zum wirksamen Hebelarm. Ist der Hebelarm groß, so wirkt nur eine geringe Kraft gemäß  $F = M/s$ . Dafür ist der Weg bzw. die Auslenkung groß, die zum Spannen des Seils/Gummibandes zurückgelegt werden kann, da der Betrag des wirksamen Hebelarms von der Segmentgröße abhängt.

Bei der Verwendung eines Gummibandes mit geringer Federkonstanten wird ein großer Weg zur Auslenkung des Gummibandes benötigt, da zum Lösen der Klettverbindung zunächst das Seil so weit ausgelenkt werden muss, so dass die Bedingung 4.2 gilt. In diesem Fall bieten sich die Morphologien aus Variante 1 und 2 an, da sie im Vergleich zu Variante 3 eine größere Auslenkung des Gummibandes ermöglichen. Der in Variante 1 und 2 größere wirksame Hebelarm hat jedoch zur Folge, dass die auf das Seil übertragene Kraft  $F_{Servoantriebe}$  unter Umständen zu gering ist, um die Klettverbindung zu lösen.

Im Fall der Verwendung eines nicht elastischen Seils bzw. eines Gummibandes mit sehr hoher Federkonstanten ist lediglich eine geringe Auslenkung des Seils/Gummibandes erforderlich, da die Kraft  $F_{Servoantriebe}$  über das Seil nahezu direkt auf die Klettverbindung übertragen wird. Variante 3, bei der die Segmente S2 und S3 aus je einem kurzen Segment bestehen, wäre hier eine geeignete Morphologie, da eine große Kraft bei geringem wirksamen Hebelarm sowie eine geringe Auslenkung gegeben sind.

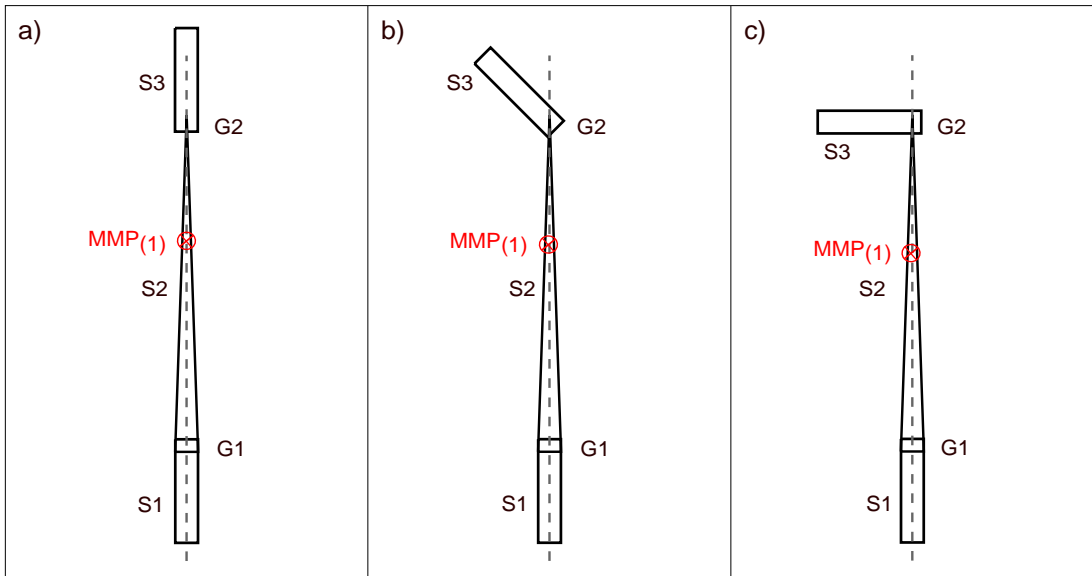


Abbildung 4.8: Bei der zweiten Morphologievariante des Anglers ist das mittlere Segment S2 viermal so lang wie die Segmente S1 und S3. In den Einzelbildern a, b und c ist die Position des  $MMP_{(1)}$  bei einem Winkel zwischen S2 und S3 von  $180^\circ$ ,  $135^\circ$  und  $90^\circ$ .

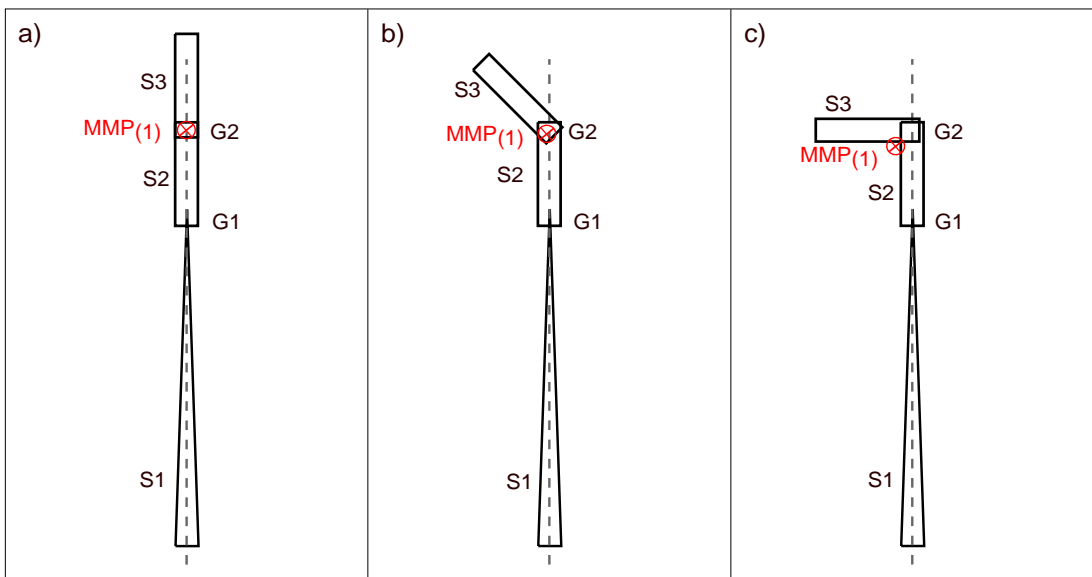


Abbildung 4.9: In Morphologievariante 3 des Anglers ist das untere Segment S1 viermal so lang wie die Segmente S2 und S3. Die Einzelbilder a, b und c zeigen die Positionsänderung des  $MMP_{(1)}$  bei einem Winkel zwischen S2 und S3 von  $180^\circ$ ,  $135^\circ$  und  $90^\circ$ .

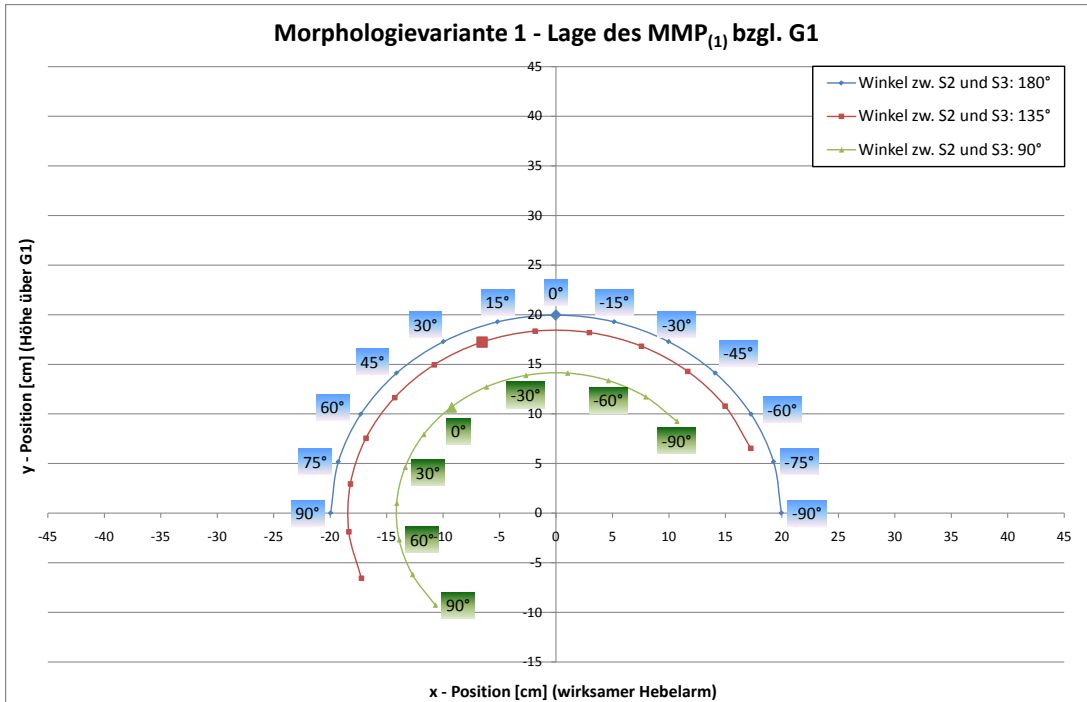


Abbildung 4.10: Morphologievariante 1 - Lageänderung des Massenmittelpunkts bzgl. G1 unter drei verschiedenen Winkeln zwischen S2 und S3.

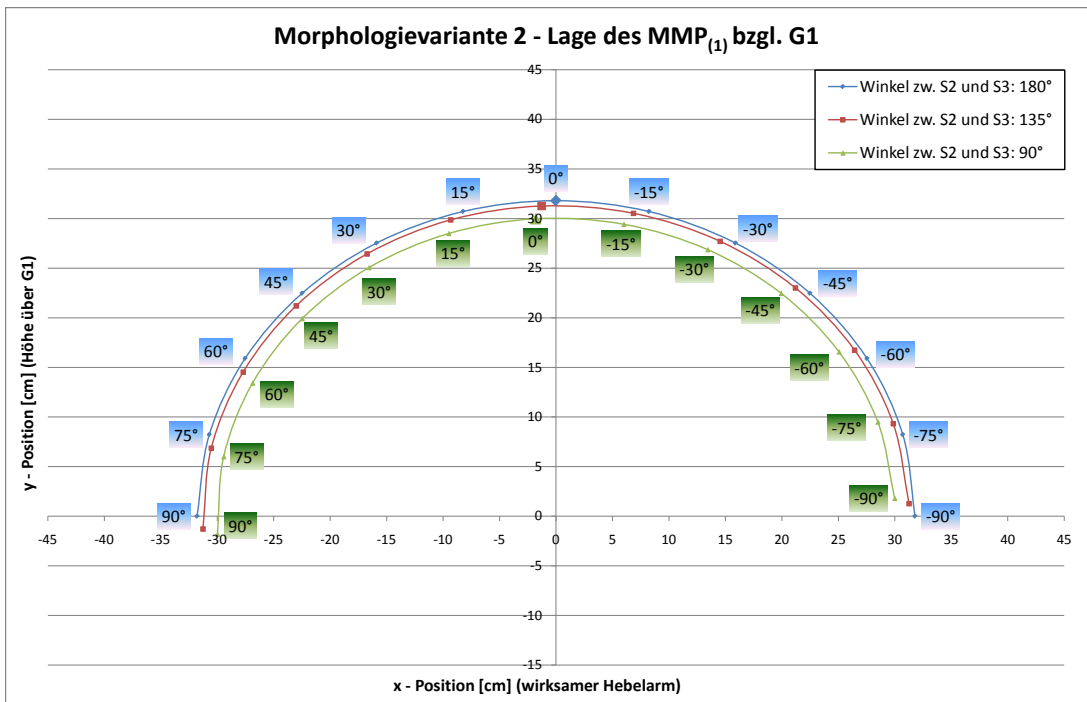


Abbildung 4.11: Morphologievariante 2 - Lageänderung des Massenmittelpunkts bzgl. G1 unter drei verschiedenen Winkeln zwischen S2 und S3.

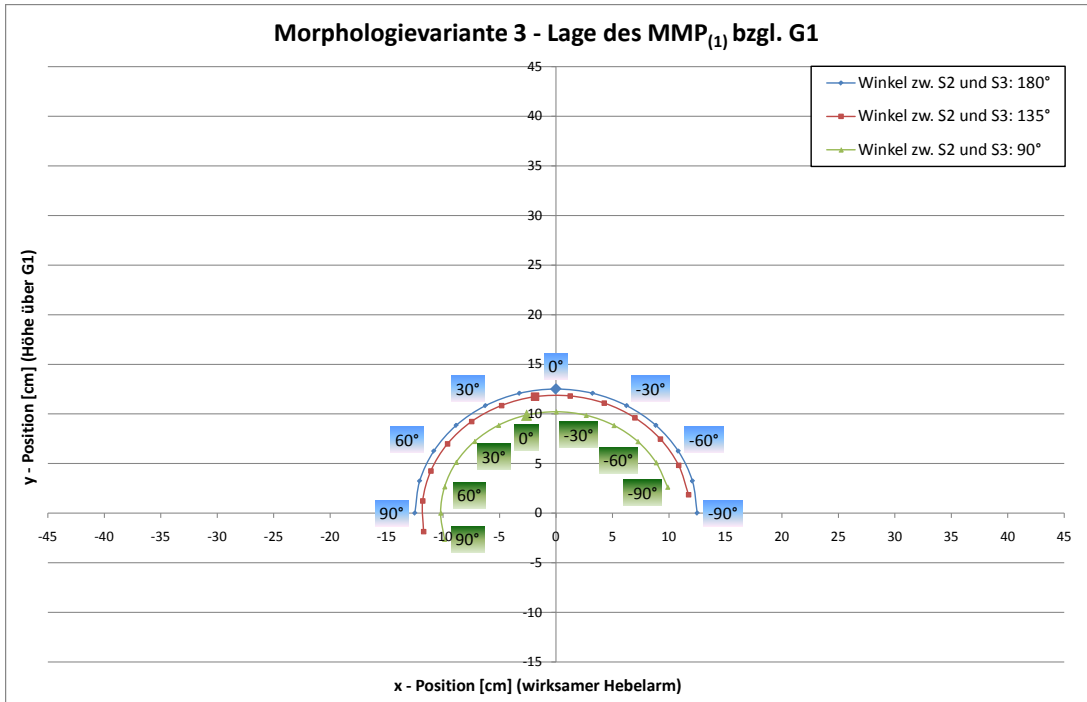


Abbildung 4.12: Morphologievariante 3 - Lageänderung des Massenmittelpunkts bzgl. G1 unter drei verschiedenen Winkeln zwischen S2 und S3.

# 5 Objekt mit zwei Freiheitsgraden und einem aktiven und einem passiven Gelenk: Angler

Im Folgenden wird erneut der Roboter Angler analysiert. Es wird gezeigt, welche Verhaltensänderungen sich aus einer Morphologieänderung hinsichtlich der Ansteuerung der Gelenke und einer Veränderung der Umwelt ergeben.

## 5.1 Objektbeschreibung

Der Angler entspricht hinsichtlich seiner Morphologie vollständig dem Roboter Angler aus dem vorangegangenen Kapitel 4. Der einzige morphologische Unterschied besteht in der Ansteuerung der Servoantriebe in den Gelenken G1 und G2. Während der Servoantrieb in G2 weiterhin mittels CSL im Contraction Mode angesteuert wird, erfolgt keine Ansteuerung des Servoantriebs in G1, so dass es sich hierbei um ein passives Gelenk handelt. Es wird an dieser Stelle auf eine erneute Beschreibung der Morphologie verzichtet und auf die Objektbeschreibung in Kapitel 4.1 verwiesen.

## 5.2 Vorbetrachtung

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei Gelenk G1 um ein passives Gelenk. Aufgrund des vorhandenen Getriebes im Servoantrieb des Gelenks G1 tritt ein Haltemoment auf, welches der von außen auftretenden Bewegungsrichtung immer entgegengerichtet wirkt. Der Betrag des Haltemoments ist unbekannt, wird jedoch als gering angenommen.

Für die Beurteilung der wirkenden Kräfte und Momente müssen die Massenmittelpunkte des mittleren und oberen Segments sowie des Gelenks G2 betrachtet werden. Der  $MMP_{(1)}$  dieser drei Elemente liegt entsprechend der Berechnung in Kapitel 4.2 oberhalb von G2. Je nach Winkel zwischen mittlerem und oberem Segment bewegt sich der  $MMP_{(1)}$  in der Bewegungsebene, d.h. der  $MMP_{(1)}$  kann sich somit auch außerhalb der Segmente befinden (vgl. Abb. 4.4). Solange sich der  $MMP_{(1)}$  rechtsseitig bzgl. der Senkrechten durch das passive Gelenk G1 befindet, wirkt aufgrund der im  $MMP_{(1)}$  angreifenden Gewichtskraft ein negatives Moment in G1.

Unabhängig davon, ob es sich bei G1 um ein aktives oder ein passives Gelenk handelt, wirkt, wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert, in den Drehpunkten kein Moment, solange sich der Angler im ausbalancierten Zustand befindet. Unter der Voraussetzung, dass

für die CSL-Parameter des aktiven Gelenks G2  $u(t-1) = 0$  und  $\omega = 0$  gilt, erfolgt somit auch keine Ansteuerung des Servoantriebs mittels CSL und es wird kein Drehmoment erzeugt. Der Angler verharrt in seiner ausbalancierten Position (vgl. Abb. 4.2).

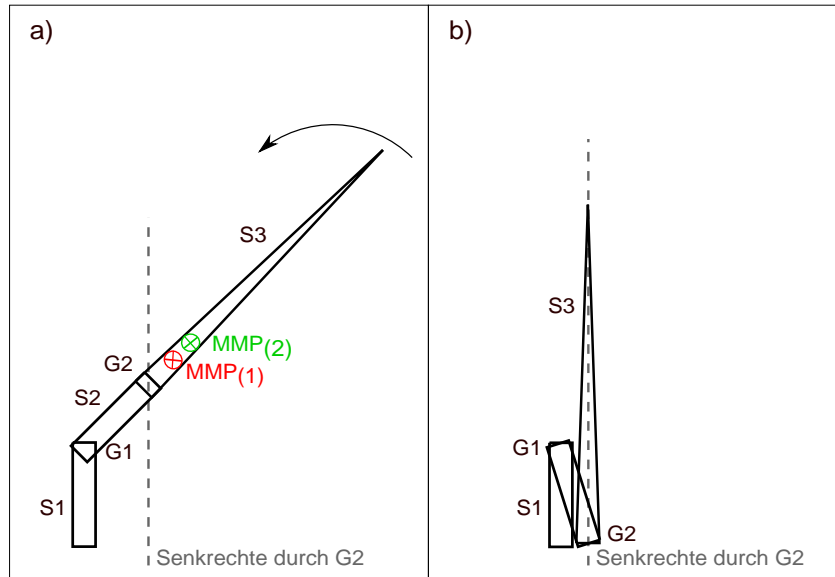


Abbildung 5.1: Bild a zeigt das Absinken des Segments S2 im Uhrzeigersinn und die damit verbundene Auslenkung von S3. Die Bewegungsrichtung von S3 mittels CSL ist durch den Pfeil gekennzeichnet. Bild b zeigt die Endposition dieser Bewegung des Anglers.

Sobald jedoch eines der beiden Segmente S2 oder S3 eine Auslenkung erfährt, verschiebt sich die Lage des  $MMP_{(1)}$ , so dass im Gelenk G1 ein Moment wirkt. Da es sich um ein passives Gelenk handelt, tritt zwar ein Haltemoment durch den Servoantrieb auf, dieses verlangsamt das Absinken des Segments S2 jedoch lediglich, bis es auf dem Boden oder einer anderen Oberfläche zu Liegen kommt. Je nachdem, ob es sich um ein negatives oder ein positives Moment handelt, welches in G1 wirkt, sinkt das Segment S2 im oder entgegen des Uhrzeigersinns. In Folge des Absinkens des Segments S2 wird das Segment S3 immer wieder ausgelenkt, so dass der  $MMP_{(2)}$  aus der Senkrechten bzgl. G2 ebenfalls ausgelenkt wird, wodurch ein Moment in G2 wirkt. Die Winkeländerung in G2 wird mittels CSL erkannt und es erfolgt eine entsprechende Gegenregelung, so dass das Segment S3 in entgegengesetzter Richtung zum wirkenden Moment bewegt wird (vgl. Abb. 5.1, Bild a). Während des Absinkens von S2 erfolgt somit eine permanente Gegenregelung, sobald der  $MMP_{(2)}$  aus der Senkrechten bzgl. G2 ausgelenkt wird. Die Bewegung des Segments S2 endet, sobald es auf einer Oberfläche liegt und sich nicht mehr bewegt. Das Segment S3 wird in Folge des durch CSL hervorgerufenen Drehmoments im Gelenk G2 solange bewegt, bis sich der  $MMP_{(2)}$  oberhalb des Drehpunktes von G2 befindet, die Kraftwirkungslinie der im  $MMP_{(2)}$  angreifenden Gewichtskraft durch die Drehachse verläuft und somit in G2 kein Moment mehr wirkt. Die Endposition der Gesamtbewegung ist in Abbildung 5.1, Bild b dargestellt.

### 5.3 Bewegungsanalyse des Anglers mit einem passiven und einem aktiven Gelenk

Im folgenden Versuch steht der Standfuß des unteren Segments waagrecht auf einer Tischoberfläche. Mittleres und oberes Segment sind im Uhrzeigersinn aus der Senkrechten ausgelenkt, wobei die Spitze des oberen Segments auf der Metallschiene einer Leuchte aufliegt. Dabei wirkt das Gelenk G1 als Festlager, die Auflage auf der Metallschiene als Loslager. Das Gelenk G1 weist einen größeren Auslenkungswinkel aus der Senkrechten im Uhrzeigersinn auf als das Gelenk G2. Der Servoantrieb in G1 ist ausgeschaltet, d.h. es handelt sich um ein passives Gelenk. Der Servoantrieb in G2 hingegen ist eingeschaltet und wird mittels CSL gesteuert, wobei die CSL-Parameter  $g_i$  und  $g_f$  unbekannt sind.

#### Bewegungsbeschreibung Bildsequenz a - e

Nach dem Einschalten des Servoantriebs im Gelenk G2 wird das mittlere Segment S2 entgegen des Uhrzeigersinns bewegt, so dass der Auslenkungswinkel des Gelenks G1 im Bezug zur Senkrechten geringer wird. Gleichzeitig wird das obere Segment im Uhrzeigersinn bewegt, wodurch es über die Metallschiene der Leuchte gezogen wird bis dessen Spitze die Auflage verliert. Während der anschließenden Fallbewegung wird G1 im Uhrzeigersinn ausgelenkt. Das obere Segment kommt abschließend auf der Metallkante der Trennwand zum Liegen (vgl. Abb. 5.2, Bild c).

Unmittelbar nachdem das obere Segment auf der Metallkante der Trennwand aufliegt, wiederholt sich die Bewegung. Das mittlere Segment S2 bewegt sich entgegen dem Uhrzeigersinn bis es eine annähernd senkrechte Position erreicht wird und sich der Drehpunkt des Gelenks G2 in etwa senkrecht über dem Drehpunkt G1 befindet (vgl. Bild e). Eine exakte Aussage zur Position der Gelenke ist aufgrund der Kameraposition nicht möglich. Die Rotation im Gelenk G2 erfolgt im Uhrzeigersinn, d.h. der Winkel zwischen beiden Segmenten nimmt ab. Als Folge der Rotation wird das obere Segment über die Metallkante der Trennwand gezogen bis dessen Spitze ihre Auflage verliert und erneut eine Fallbewegung auftritt. Das obere Segment S3 kommt mit der Spitze auf einem Holzklötz zum Liegen.

#### Funktionsbeschreibung Bildsequenz a - e

Der Standfuß des Anglers steht plan auf der Tischoberfläche. Für eine Bewegung des Standfußes muss die Haftreibung und anschließend die Gleitreibung zwischen Tischoberfläche und Standfuß überwunden werden, d.h. es handelt sich um eine kraftschlüssige Verbindung. An der Auflage zwischen oberem Segment und Metallschiene der Leuchte bzw. Metallkante der Trennwand treten ebenfalls Reibungskräfte auf, allerdings sind Haftreibung bzw. Gleitreibung wesentlich geringer als bei Standfuß und Tischoberfläche. Auch hier handelt es sich um eine kraftschlüssige Verbindung.

In Folge der im Massenmittelpunkt  $MMP_{(1)}$  angreifenden Gewichtskraft wird das Gelenk G2 nach unten in Richtung der Tischoberfläche bewegt. Diese Bewegung ver-

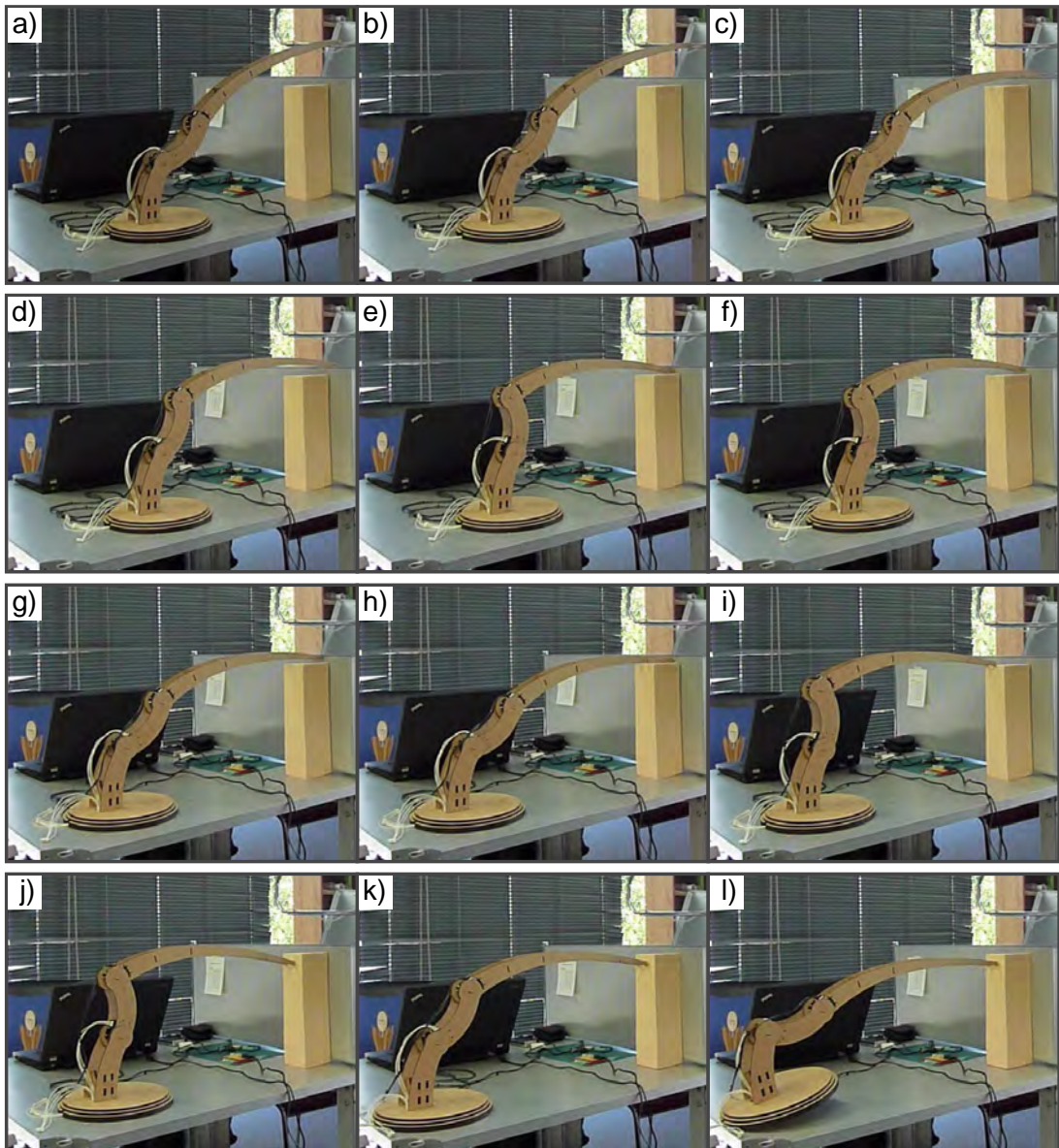


Abbildung 5.2: Die Abbildung zeigt die Bewegungssequenz des Anglers mit G1 als passivem und G2 als aktivem Gelenk. Im Verlauf der Bewegung wird abwechselnd das obere Segment S3 über eine Oberfläche gezogen oder der Standfuß über die Tischoberfläche geschoben.



ursacht eine dem Uhrzeigersinn entgegen gerichtete Bewegung des Segments S3 und im Gelenk G2 wirkt ein positives Moment. Die Winkeländerung zwischen mittlerem und oberem Segment wird durch CSL erfasst und es erfolgt eine Gegenregelung, indem ein negatives Drehmoment durch den Servoantrieb eingebracht wird und das Gesamtmoment in G2 ebenfalls negativ wird. Die Folge dieses negativen Drehmoments in G2 ist zum einen eine – im Bezug zur Senkrechten durch das Gelenk G1 – positive Winkeländerung des mittleren Segments entgegen des Uhrzeigersinns, zum anderen eine negative Winkeländerung im Uhrzeigersinn – im Bezug zur Senkrechten durch das Gelenk G2 – des oberen Segments. Dadurch wird das obere Segment horizontal auf der Metallschiene der Leuchte bewegt, die Haftreibung überwunden und die Spitze des oberen Segments über die Metallschiene gezogen, bis das Ende der Auflagefläche erreicht ist und das obere Segment nach unten auf die Metallkante der Trennwand fällt.

Während der Fallbewegung ist eine deutliche Winkeländerung im Uhrzeigersinn in G1 zu erkennen. Das in positiver Richtung wirkende Haltemoment in G1 verzögert die Fallbewegung minimal. In G2 wirkt nahezu kein Moment, da sich mittleres und oberes Segment sowie G2 annähernd im freien Fall befinden. Damit erfolgt auch keine Änderung des Drehmoments des Servoantriebs durch CSL. Unmittelbar nachdem das obere Segment auf der Metallkante der Trennwand zur Ruhe gekommen ist, wirken die bereits während der Auflage auf der Metallschiene der Leuchte aufgetretenen Momente und es wiederholt sich der bereits beschriebene Bewegungsablauf.

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz f - h**

Unmittelbar nachdem die Spitze des oberen Segments auf dem Holzklötz zum Liegen gekommen ist, wird das obere Segment S3 entgegen des Uhrzeigersinns bewegt. Dabei hebt die Spitze des oberen Segments zu Beginn minimal vom Holzklötz ab und bleibt an der Unterkante der Metallkante der Trennwand hängen. Daraufhin bewegt sich der Standfuß auf der Tischoberfläche nach links in entgegengesetzter Richtung zur Trennwand. Haben S2 und S3 die in Bild h dargestellte Position erreicht, fällt die Spitze von S3 wieder auf den Holzklötz zurück und die Bewegung des Standfußes kommt zum Erliegen.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz f - h**

Während des Bewegungsablaufs in den Bildern a - e wurde durch CSL ein negatives Moment eingebracht. In der nun folgenden Bewegung tritt ein positives Moment auf. Die Ursache ist in der geänderten Stellung des mittleren Segments zu finden. Wie in Bild e zu erkennen ist, befindet sich G2 nahezu senkrecht über G1. Als Folge wirkt bzgl. des auftretenden Moments in G2 nur noch der Massenmittelpunkt des oberen Segments  $MMP_{(2)}$ . Während der Fallbewegung des oberen Segments von der Metallkante der Trennwand auf den Holzklötz tritt ein negatives Moment in G2 auf. CSL reagiert auf diese Winkeländerung mit einem positiven Drehmoment, wodurch das obere Segment S3 entgegen des Uhrzeigersinns bewegt wird. Die Spitze des oberen Segments wird vom Holzklötz abgehoben und bleibt an der Unterkante der Trennwand hängen (vgl. Bild f). Da G1 ein passives Gelenk ist und der  $MMP_{(1)}$  weiterhin rechtsseitig bzgl. der

Senkrecht durch G1 liegt, wirkt in G1 ein negatives Moment, wodurch die Spitze des oberen Segments nahezu waagrecht gegen die Trennwand gedrückt wird. Die dabei wirkende Kraft ist ausreichend, damit die Spitze an der Unterkante hängen bleibt.

Da die Spitze des oberen Segments nun als Festlager wirkt, tritt die Verbindung zwischen Tischoberfläche und Standfuß als Loslager auf. Die Haftreibung wird als Folge der Rotation in G2 überwunden und der Standfuß bewegt sich auf der Tischoberfläche nach links. Dabei nimmt die auf die Trennwand wirkende Kraft kontinuierlich ab, da die Position des mittleren Segments und der damit für diese Kraft erforderliche wirksame Hebelarm ebenfalls geringer werden. Das durch CSL hervorgerufene positive Drehmoment in G2 wird so lange eingebracht, bis die ursächliche Bedingung (negatives Moment durch oberes Segment) entfällt. Dies ist der Fall, wenn der Betrag der nahezu waagrecht gerichteten Kraft auf die Trennwand Null erreicht und die Spitze zurück auf den Holzklötz fällt (vgl. Bild h).

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz i - j**

Das mittlere Segment bewegt sich im weiteren Bewegungsablauf entgegen des Uhrzeigersinns bis eine annähernd senkrechte Position erreicht wird, so dass sich der Drehpunkt des Gelenks G2 in etwa über dem Drehpunkt G1 befindet. Die Spitze des oberen Segments S3 wird über die Auflagefläche des Holzklötzes gezogen bis das Ende der Auflagefläche erreicht ist und die Spitze wenige Zentimeter an der Stirnseite des Holzklötzes hinabgleitet.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz i - j**

Die Bewegungsabfolge entspricht der bereits zuvor dargestellten Beschreibung (vgl. Funktionsbeschreibung Bildsequenz a - e). In G2 wirkt ein positives Moment, wodurch CSL durch Einbringen eines negativen Drehmoments entgegenwirkt. Das mittlere Segment bewegt sich entgegen des Uhrzeigersinns, das obere Segment im Uhrzeigersinn, wodurch sich der Winkel zwischen beiden Segmenten verringert. Dabei wird eine senkrecht wirkende Kraft durch die Spitze auf den Holzklötz übertragen, d.h. die Spitze drückt von oben auf den Holzklötz. Wenn die Spitze die Auflagefläche auf dem Holzklötz verliert, bewegt sie sich wenige Zentimeter an der Stirnfläche des Holzklötzes nach unten. Dabei wirkt, wie bereits in der Funktionsbeschreibung Bildsequenz f - h beschrieben, in Folge des negativen Moments in G1 eine nahezu waagrecht gerichtete Kraft über die Spitze auf die Stirnseite des Holzklötzes.

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz k - l**

Das mittlere Segment S2 bewegt sich im Uhrzeigersinn, das obere Segment entgegen dem Uhrzeigersinn. Der Winkel zwischen beiden Segmenten nimmt damit zu. Betrachtet man den Spalt zwischen Holzklötz und Trennwand, so ist zu erkennen, dass zu Beginn der Bewegung der Spalt abnimmt, da der Holzklötz gegen die Trennwand geschoben wird (vgl. Bild k). Parallel dazu bewegt sich der Standfuß auf der Tischoberfläche weiter nach links und hebt, nachdem die äußere linke Kante des Standfußes die Tischaußenkante erreicht hat, ab, sodass der Standfuß die Tischoberfläche nur noch

mit seiner äußeren linken Kante berührt. Die Gelenke G1 und G2 sowie die Spitze des oberen Segments liegen exakt auf einer Linie. An dieser Stelle wird der Versuch beendet.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz k - l**

Ausgangssituation für die Bewegung ist die Situation in Bild j. Die Drehpunkte von G1 und G2 befinden sich nahezu senkrecht übereinander. In G1 wirkt als Folge der Lage des  $MMP_{(1)}$  ein negatives Moment, wodurch eine nahezu waagrecht gerichtete Kraft, übertragen durch die Spitze, auf die Stirnseite des Holzklotzes wirkt. In G2 wirkt ebenfalls ein negatives Moment, verursacht durch die kurze Fallbewegung unmittelbar nach dem Verlust der Auflage auf dem Holzklotz. Als Folge der durch CSL erfassten Winkeländerung wird ein positives Drehmoment in G2 erzeugt. Aufgrund der Tatsache, dass das obere Segment leicht gekrümmt ist und sich der Drehpunkt in G2 in etwa auf gleicher Höhe wie die Position der Spitze an der Stirnseite des Holzklotzes befindet, kann erneut die Haftreibung der Verbindung zwischen Spitze und Holzklotz nicht überwunden werden. Diese Verbindung stellt wie bei Bildsequenz f - h das Festlager dar, während der Standfuß das Loslager ist und das positive Moment in G2 ausreicht, um die Haftreibung zwischen Standfuß und Tischoberfläche zu überwinden. In der Bildsequenz f - h kam die Bewegung zum Erliegen, als die nahezu waagrecht gerichtete Kraft auf die Trennwand Null erreichte und damit die Spitze zurück auf den Holzklotz fiel. Der Winkel zwischen mittlerem und oberem Segment erreichte dabei einen Wert kleiner als  $180^\circ$ . In Bild l bricht der Versuch bei einem Winkel von ca.  $180^\circ$  ab. In diesem Fall erreicht die auf die Stirnseite des Holzklotzes übertragene Kraft nicht Null, da die Bewegung des Standfußes durch die Tischaußenkante verhindert wird. Folglich wirkt nach wie vor ein negatives Moment in G2, wodurch die Regelung durch CSL in Form eines positiven Drehmoments aktiv ist.

## **5.4 Zusammenfassung**

Die soeben beschriebene Bewegungssequenz besteht insgesamt aus lediglich zwei Teilbewegungen des Anglers. Die erste Teilbewegung - das Ziehen des oberen Segments S3 über eine Oberfläche - resultiert aus dem in G2 wirkenden positiven Moment infolge der Auslenkung der Segmente S2 und S3, der angreifenden Kräfte sowie der Auflage der Spitze von Segment S3 auf einer Oberfläche.

Solange die Spitze des Segments S3 auf einer Oberfläche aufliegt und sich der  $MMP_{(1)}$  rechtsseitig vom passiven Gelenk G1 befindet, wirkt in G1 ein negatives Moment. Da es sich um ein passives Gelenk handelt, bewegt sich das Segment S2 im Uhrzeigersinn und das Gelenk G2 nähert sich der Tischoberfläche. Da zum selben Zeitpunkt die Spitze des Segments S3 auf einer Oberfläche aufliegt, wirkt in G2 ein positives Moment (vgl. Abb. 5.3, Bild a). Die Winkeländerung wird durch CSL erkannt und es erfolgt eine entsprechende Gegenregelung, in dem ein negatives Drehmoment erzeugt wird, so dass das Segment S3 im Uhrzeigersinn bewegt wird. In Folge der Bewegung von S3 wird das Segment S2 entgegen des Uhrzeigersinns bewegt (vgl. Abb. 5.3, Bild b). Diese Teilbewegung wird solange fortgesetzt, bis die Spitze des Segments S3 nicht mehr auf einer Oberfläche aufliegt und sich G2 rechtsseitig bzgl. der Senkrechten durch G1

befindet, so dass kein positives Moment mehr in G2 wirkt.

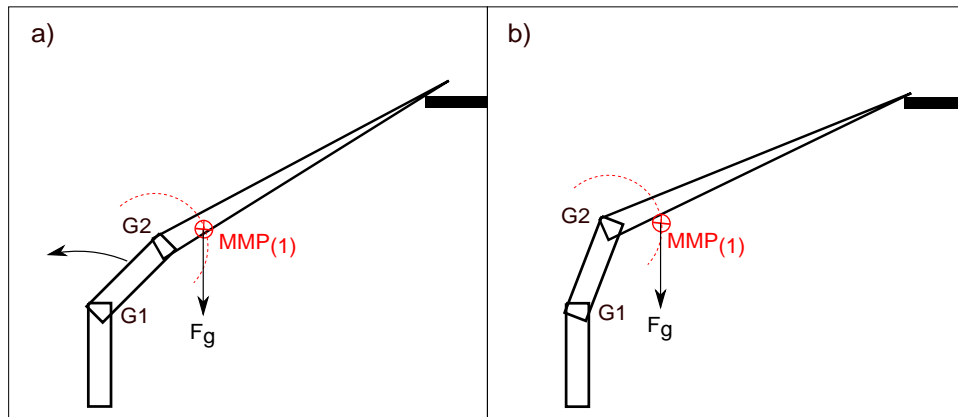


Abbildung 5.3: Erste Teilbewegung, bei der ein positives Moment in G2 wirkt, ein negatives Drehmoment durch CSL erzeugt und damit das Segment S2 entgegen des Uhrzeigersinns bewegt und das obere Segment S3 über eine Oberfläche gezogen wird.

Die Voraussetzung für die zweite Teilbewegung - die Bewegung des Standfußes auf der Tischoberfläche - ist zum einen das Wirken eines negativen Moments in G2, zum anderen muss die aus dem positiven Drehmoment von G2 resultierende Bewegung der Spitze von S3 blockiert werden.

Sobald die Spitze des Segments S3 nicht mehr auf einer Oberfläche aufliegt, wirkt in Folge der im  $MMP(2)$  angreifenden Gewichtskraft in G2 ein negatives Moment. Die Winkeländerung wird mittels CSL erkannt und am Servoantrieb ein positives Drehmoment erzeugt, so dass das Segment S3 entgegen des Uhrzeigersinns bewegt wird (vgl. Abb. 5.4, Bild a). Durch die Blockierung der Bewegung des Segments S3 wird der Ausgangsparameter  $u(t)$  permanent größer, so dass die Kraftübertragung auf den Standfuß ausreicht, um die Haftreibung zu überwinden und den Standfuß auf der Tischoberfläche zu bewegen (vgl. Abb. 5.4, Bild b). Diese zweite Teilbewegung erfolgt solange, bis entweder das Segment S3 wieder frei ist, so dass das durch CSL hervorgerufene positive Drehmoment in G2 an Stelle des Standfußes das Segment S3 bewegt oder bis der Standfuß aufgrund äußerer Einflüsse, ebenso wie das Segment S3, in seiner Bewegung behindert wird und der Angler somit in seiner Position verbleibt. Der Ausgangsparameter  $u(t)$  würde in diesem Fall solange ansteigen, bis er seinen Maximalwert von 1 erreicht und diesen beibehalten. Dies würde wiederum zu einer Überlastung des Servoantriebs führen, sollte der Servoantrieb nicht rechtzeitig ausgeschaltet werden.

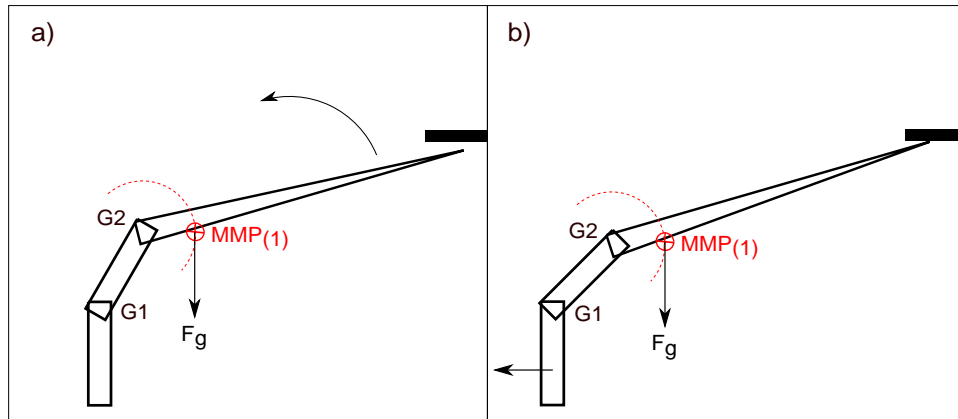


Abbildung 5.4: Zweite Teilbewegung, bei der in G2 ein negatives Moment wirkt, durch CSL ein positive Drehmoment in G2 erzeugt und das Segment S3 entgegen des Uhrzeigersinns bewegt wird. In Folge der Blockierung der Bewegung erfolgt eine Kraftübertragung, so dass der Standfuß auf dem Boden bewegt wird.

## 6 Objekt mit zwei Freiheitsgraden: Ovaloid

In diesem Kapitel wird der Roboter Ovaloid analysiert, der aus drei Segmenten und zwei Gelenken besteht und für die Bewegung in einer Umwelt konstruiert ist, in der er sich auf dem Boden bewegen kann. Es wird untersucht, welchen Einfluss die Form der Segmente auf die Bewegung des Ovaloids hat und welche Verhaltensmuster sich daraus ergeben. Des Weiteren wird analysiert, inwiefern sich die Bewegung des Roboters in seiner Umwelt verändert, wenn die Form der Segmente geändert wird.

### 6.1 Objektbeschreibung

Der Ovaloid ist eine aus drei Elementen bestehende Holzkonstruktion. Das mittlere Element des Ovaloids ist ein Quader, der zwei Servoantriebe aufnimmt und im Folgenden als Servobrücke bezeichnet wird. Der Massenmittelpunkt der Servobrücke wird mit  $MMP_{SB}$  bezeichnet. Die beiden äußeren Elemente sind in ihrer Form identisch und werden im Folgenden mit Disk(1) und Disk(2) bezeichnet. Eine Disk besteht aus einer ovalen Scheibe, deren äußere Seite abgeflacht ist und deren innere Seite vier Streben aufweist, die wiederum mit dem Ruderhorn des Servoantriebs verbunden sind und damit ein Gelenk darstellen. Die Disks sind um  $60^\circ$  zueinander versetzt angeordnet und jede Disk wird mittels eines eigenen Servoantriebs angesteuert. Bei den Servoantrieben handelt es sich wiederum um Dynamixel RX-28 [9]. Die jeweilige Position, an der die Disks Kontakt mit dem Boden haben, wird als Auflagepunkt bezeichnet. Entsprechend der Bezeichnung der Disks mit (1) und (2) werden die zugehörigen Gelenke ebenfalls mit G1 und G2 bezeichnet. Die Rotationsachse des Ovaloids ergibt sich aus der Geraden, die durch die Mittelpunkte beider Disks führt (vgl. Abb. 6.3). Da sich aus der Videoanalyse keine Konstruktionsdetails entnehmen lassen, wird die Lage der Massenmittelpunkte  $MMP_{Disk(1)}$  und  $MMP_{Disk(2)}$  im jeweiligen Mittel- und Drehpunkt der Disk angenommen. Der Einfluss der Streben wird als sehr gering angenommen und damit vernachlässigt. Die Ausrichtung des Bodens wird als orthogonal zur wirkenden Gewichtskraft angenommen.

### 6.2 Vorbetrachtung

Für die Analyse der Bewegung des Ovaloids wird folgende Konvention getroffen. Die Bewegungsrichtung der Disks wird immer aus Sicht der Servoantriebe angegeben. Ist die seitliche Ansicht der Servobrücke wie in Abbildung 6.1 sichtbar, so wird die Drehrichtung/Auslenkung der Disks entsprechend der Draufsicht angegeben. In diesem Fall ist Disk(1) im Uhrzeigersinn und Disk(2) entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt, so dass sich die Disks zum Betrachter hin öffnen. Ist die Draufsicht der Servobrücke wie in Abbildung 6.2 sichtbar, so ist die Auslenkung der Disks deutlich zu erkennen und

wird ebenfalls im bzw. entgegen des Uhrzeigersinns angegeben. Die Bewegungsebene der Servoantriebe verläuft orthogonal zu den Drehachsen der Servoantriebe.



Abbildung 6.1: Ovaloid mit seitlicher Ansicht der Servobrücke.



Abbildung 6.2: Ovaloid mit Draufsicht der Servobrücke.

### Grundlage für das Auftreten eines Moments in den Gelenken G1 und G2:

Eine Auslenkung beider Disks von  $0^\circ$  bedeutet, dass Servobrücke und Disks senkrecht zueinander stehen. Für den Fall, dass die seitliche Ansicht der Servobrücke sichtbar ist, wirkt in den Gelenken G1 und G2 kein Moment, da die Wirkrichtung der im  $MMP_{SB}$  angreifenden Gewichtskraft senkrecht zur Bewegungsebene der Gelenke G1 und G2 verläuft. Auch die Stellung der Disks bewirkt kein Moment in den Gelenken G1 und G2, da die Massenmittelpunkte  $MMP_{Disk(1)}$  und  $MMP_{Disk(2)}$  nach wie vor senkrecht über ihren jeweiligen Auflagepunkten liegen. Unter der Voraussetzung, dass  $u(t-1) = 0$  und  $\omega = 0$  gilt, erfolgt weder in Gelenk G1 noch in G2 eine Ansteuerung der Servoantriebe mittels CSL, so dass kein Drehmoment in den Gelenken G1 und G2 erzeugt wird.

Ein Moment tritt in den Servoantrieben auf, wenn die Bewegungsebene nicht orthogonal zur im  $MMP_{SB}$  angreifenden Gewichtskraft  $F_g$  liegt. Der Betrag des Moments ist vom Winkel der Bewegungsebene abhängig. Das maximale Moment tritt auf, wenn Bewegungsebene und Gewichtskraft in einer Ebene liegen, so dass die Draufsicht der Servobrücke sichtbar ist. Neben dem Moment, welches durch die Servobrücke auf die Gelenke G1 und G2 wirkt, können zusätzliche Momente durch die Disks eingebracht werden. Je stärker die Lage einer Disk von der senkrechten Position zum Boden abweicht, desto größer wird der wirksame Hebelarm zwischen Auflagepunkt der Disk am Boden und der Position des  $MMP_{Disk(1)}$  bzw.  $MMP_{Disk(2)}$  und damit dem Moment, das im entsprechenden Gelenk G1 bzw. G2 wirkt. Die Richtung des im Gelenk wirksamen Moments ergibt sich aus der links- oder rechtsseitigen Auslenkung der Disk und der damit zusammenhängenden Auslenkung ihres jeweiligen Massenmittelpunkts aus der Senkrechten bzgl. des Auflagepunkts.

### Grundlage für das Auftreten eines Moments in der Rotationsachse:

Eine Rotation des Ovaloids tritt auf, wenn senkrecht zur im  $MMP_{SB}$  angreifenden Gewichtskraft  $F_g$  und waagrecht durch die Rotationsachse ein wirksamer Hebelarm vorhanden ist und damit ein Moment in der Rotationsachse wirkt. Ein solcher Hebelarm ist vorhanden, wenn die Position des  $MMP_{SB}$  und die Rotationsachse nicht exakt senkrecht in einer Ebene liegen.

In der in Abbildung 6.3, Bild a dargestellten Position des Ovaloids sind die Disks bzgl. der Servobrücke um  $0^\circ$  ausgelenkt und die Draufsicht der Servobrücke ist sichtbar. In Folge der im  $MMP_{SB}$  angreifenden Gewichtskraft  $F_g$  wirkt im Gelenk G1 ein negatives und in G2 ein positives Moment, wodurch sich die Servobrücke dem Boden annähern würde und Disk(1) im Uhrzeigersinn und Disk(2) entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt werden würde. Diese Winkeländerung wird durch CSL des jeweiligen Servoantriebs erfasst und es erfolgt eine entsprechende Gegenregelung, so dass in G1 ein positives Drehmoment und in G2 ein negatives Drehmoment erzeugt wird. Disk(1) wird somit entgegen des Uhrzeigersinns und Disk(2) im Uhrzeigersinn bewegt, wodurch sich der Abstand der Auflagepunkte von Disk(1) und Disk(2) verringert und die Servobrücke angehoben wird, so dass sich der  $MMP_{SB}$  oberhalb der Rotationsachse befindet (vgl. Abb. 6.3, Bild b).

Solange die Servobrücke bei dieser Bewegung der Disks lediglich vertikal bzgl. der Rotationsachse ausgelenkt wird, tritt keine Rotation des Ovaloids auf, da der  $MMP_{SB}$  senkrecht über der Rotationsachse liegt und somit kein Moment in dieser auftritt. Durch die ovale Form und versetzten Anordnung der Disks von  $60^\circ$  zueinander wird die Situation vermieden, dass der  $MMP_{SB}$  exakt senkrecht oberhalb der Rotationsachse liegt. In Folge der Rotation des Ovaloids bewegt sich die Servobrücke auf einer Kreisbahn um die Rotationsachse und es verringert sich der Abstand zwischen Servobrücke und Boden. Nach einer Drehung von ca.  $180^\circ$  ist Disk(1) im Uhrzeigersinn und Disk(2) entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt (vgl. Abb. 6.3, Bild c).

Die im  $MMP_{SB}$  angreifende Gewichtskraft bewirkt im Gelenk G1 ein negatives Moment und in G2 ein positives Moment. Die Winkeländerung wird mittels CSL des jeweiligen Servoantriebs erfasst und führt in beiden Fällen zu einer Änderung der Ausgangsspannung  $u(t)$ , so dass Disk(1) entgegen des Uhrzeigersinns und Disk(2) im Uhrzeigersinn bewegt wird. Der Ovaloid befindet sich nun wieder in der Ausgangsposition und die Bewegung beginnt erneut (vgl. Abb. 6.3, Bild a). Die Folge ist aufgrund der ovalen Form der Disks eine schlängelnde Fortbewegung des Ovaloids.



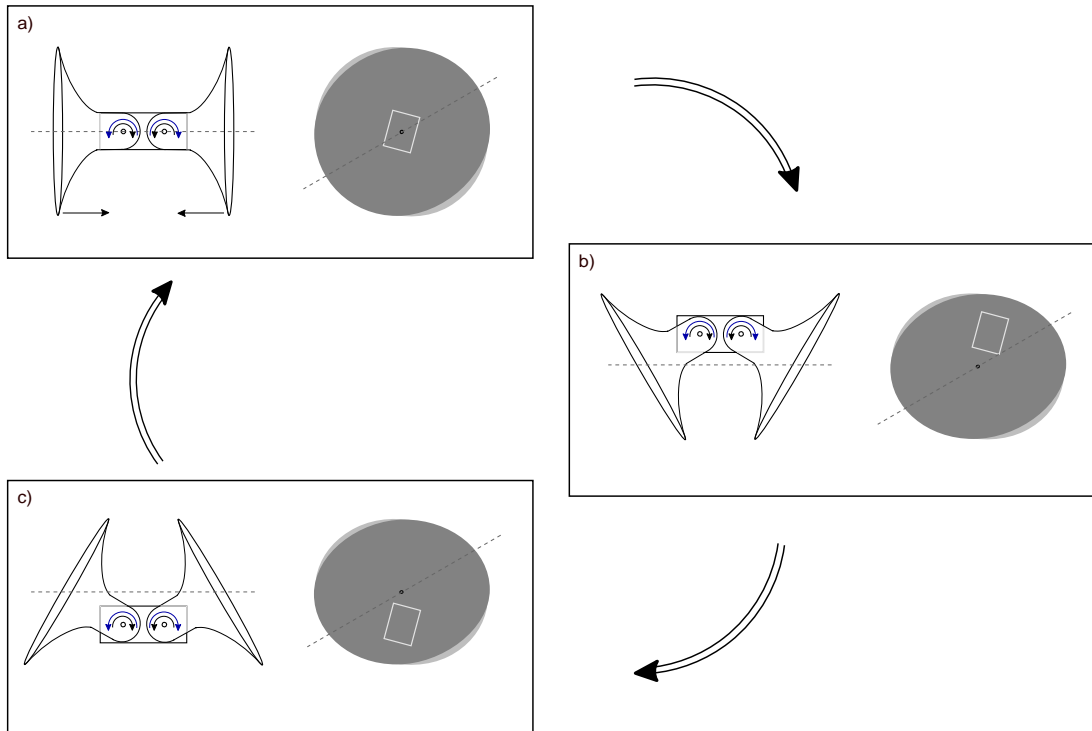


Abbildung 6.3: Die Abbildung zeigt die grundlegenden Schritte der Rotationsbewegung des Ovaloids. Die Einzelbilder zeigen den Ovaloid inkl. der Rotationsachse (links) und die Ansicht der Aussenseiten der Disks inkl. der Symmetrieachse und der Lage der Servobrücke (rechts). Die Wirkrichtung der auftretenden Momente in den Gelenken ist schwarz und das durch CSL hervorgerufene Drehmoment ist blau dargestellt.

### 6.3 Bewegungsanalyse des Ovaloids - Rotationsbewegung

Im folgenden Versuch befinden sich die Auflagepunkte der Disk(1) und Disk(2) des Ovaloids auf dem Boden, welcher mit Teppich ausgelegt ist (vgl. Abb. 6.4). Die Servoantriebe in den Gelenken G1 und G2 sind eingeschaltet und werden mittels CSL im Contraction Mode angesteuert. Die exakte Einstellung der CSL-Parameter  $g_i$  und  $g_f$  ist unbekannt. Zwischen den beiden Servoantrieben erfolgt keinerlei Kommunikation, so dass sie unabhängig voneinander arbeiten.

#### Bewegungsbeschreibung Bildsequenz a - d

Zu Beginn der Bewegungsfolge ist Disk(1) entgegen des Uhrzeigersinns und Disk(2) um  $0^\circ$  ausgelenkt. Im Folgenden wird Disk(1) im Uhrzeigersinn und Disk(2) entgegen des Uhrzeigersinns bewegt, so dass sie sich zum Betrachter hin öffnen. Während dieser Bewegung beginnt der Ovaloid dem Betrachter entgegen zu rollen, wobei die Disks insgesamt in etwa um  $150^\circ$  bzgl. ihrer Ausgangslage rotieren. Der Abstand der Servobrücke zum Boden wird während der Rotation des Ovaloids verkürzt, so dass sie sich

unterhalb der Rotationsachse befindet (vgl. Bild d). Die Auslenkung von Disk(2) im Uhrzeigersinn ist größer als die Auslenkung von Disk(1) entgegen des Uhrzeigersinns.

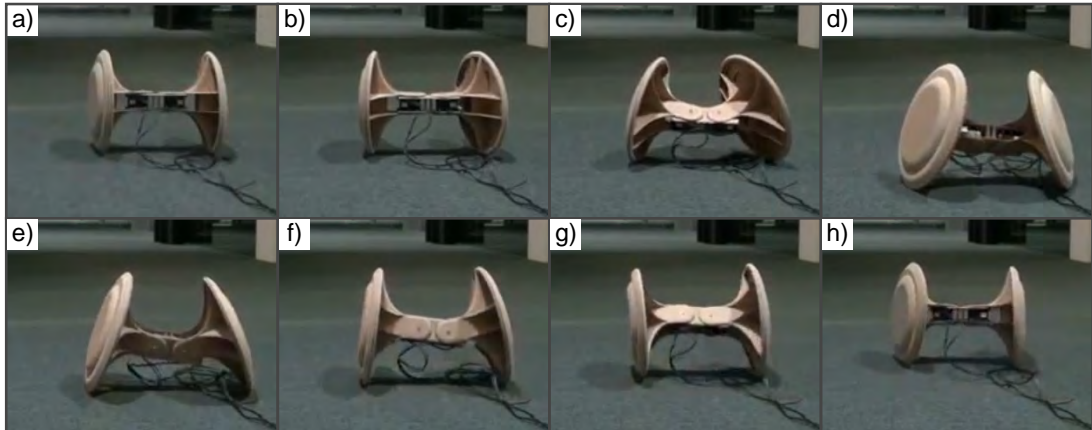


Abbildung 6.4: Die Bewegungssequenz zeigt die Rotationsbewegung des Ovaloids auf dem Boden sowie die unterschiedlichen Stellungen der Disks und der Servobrücke, die dieses Verhalten verursachen.

#### Funktionsbeschreibung Bildsequenz a - d

In Folge der Auslenkung von Disk(1) entgegen dem Uhrzeigersinn und keiner Auslenkung von Disk(2) befindet sich der  $MMP_{SB}$  außerhalb der Rotationsachse. Der Abstand zwischen  $MMP_{SB}$  und Rotationsachse fungiert als wirksamer Hebelarm und verursacht in Kombination mit der im  $MMP_{SB}$  angreifenden Gewichtskraft  $F_g$  ein Moment in der Rotationsachse, jedoch kein Moment in den Gelenken G1 und G2. Im Video ist keine Rotation des Ovaloids erkennbar, so dass auch keine Änderung des Winkels der Bewegungsebene erfolgt, die die Voraussetzung für das Wirken von Momenten in den Gelenken G1 und G2 ist.

Da jedoch beide Gelenke angesteuert werden, lässt dies den Schluss zu, dass sich der Winkel der Bewegungsebene bereits zu Beginn nicht exakt parallel zum Boden befindet, so dass in G1 ein positives Moment und in G2 ein negatives Moment wirkt. Die entsprechenden Winkeländerungen werden vom jeweiligen CSL der Gelenke G1 und G2 erkannt und ein entgegengesetztes Drehmoment durch die Servoantriebe erzeugt, so dass Disk(1) im Uhrzeigersinn und Disk(2) entgegen des Uhrzeigersinns bewegt wird. Die Disks öffnen sich dem Betrachter und der horizontale Abstand zw. Rotationsachse und  $MMP_{SB}$  vergrößert sich. Der Abstand als wirksamer Hebelarm und die im  $MMP_{SB}$  angreifende Gewichtskraft verursachen eine Bewegung des Ovaloids in Richtung des Beobachters, jedoch nicht unmittelbar nach Beginn der Ansteuerung der Servoantriebe, da zunächst das in der Rotationsachse wirkende Moment geringer als die Haftreibung der Auflagepunkte der Disks auf dem Boden ist. Mit fortschreitender Ansteuerung nimmt die Auslenkung der Servobrücke und damit der wirksame Hebelarm zu, die Haftreibung wird überwunden, der Ovaloid wird beschleunigt und

rotiert auf den Betrachter zu (vgl. Bild c). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Auslenkung von Disk(1) im Uhrzeigersinn größer als die Auslenkung von Disk(2) entgegen des Uhrzeigersinns ist. Mögliche Gründe hierfür sind beispielsweise die unterschiedliche Ausgangsstellung der Disks oder unterschiedliche Haftreibungskräfte an den Auflagepunkten der Disks.

Mit steigendem Rotationswinkel des Ovaloids nimmt das negative Moment in Gelenk G1 und das positive Moment in G2 in Folge der im  $MMP_{SB}$  angreifenden Gewichtskraft zu. Das jeweilige Maximum wird erreicht, wenn die Bewegungsebene der Servoantriebe und die Wirkrichtung von  $F_g$  in der gleichen Ebene liegen. In Folge der Rotation des Ovaloids und der Auslenkung der Disks befindet sich der  $MMP_{Disk(1)}$  rechtsseitig bezüglich der Senkrechten durch den Auflagepunkt von Disk(1), so dass in G1 ein zusätzliches negatives Moment wirkt. Analog dazu wirkt in Folge der Auslenkung von Disk(2) ein zusätzliches positives Moment im Gelenk G2. Der Betrag dieser Momente erreicht sein Maximum, wenn die Bewegungsebene der Servoantriebe und die Wirkrichtung von  $F_g$  in der gleichen Ebene liegen. Im weiteren Verlauf der Rotation des Ovaloids nimmt das jeweilige Moment in G1 und G2 wieder ab (vgl. Bild d).

Während der bisherigen Rotation des Ovaloids verändert sich der Betrag des Moments in G1 und G2, die Richtung bleibt in G1 jedoch konstant negativ und in G2 konstant positiv. Die entsprechende Winkeländerung wird mittels des jeweiligen CSL erkannt und es erfolgt eine entsprechende Gegenregelung, in dem der Servoantrieb in G1 ein positives Drehmoment und der Servoantrieb in G2 ein negatives Drehmoment erzeugt. Die Auswirkung dieser Gegenregelung wird jedoch erst im weiteren Bewegungsverlauf deutlich.

Betrachtet man die Bewegung des Ovaloids unter Berücksichtigung der Energieerhaltung  $E_{pot} = E_{kin}$ , so wird die anfangs in der Servobrücke gespeicherte potentielle Energie  $E_{pot}$  in kinetische Energie  $E_{kin}$  umgewandelt. Die Servobrücke verringert ihre Höhe und wird dabei beschleunigt. Die potentielle Energie ist am geringsten, wenn der Abstand der Servobrücke zum Boden am geringsten ist, d.h. wenn sich der Ovaloid bzgl. der Ausgangslage (vgl. Bild a) um  $90^\circ$  auf den Betrachter zubewegt hat. Der Ovaloid verharrt jedoch nicht in dieser Position, sondern bewegt sich über diese Position hinaus und kommt nach ca.  $150^\circ$  kurzzeitig zur Ruhe (vgl. Bild c).  $E_{kin}$  nimmt dabei wieder ab,  $E_{pot}$  nimmt zu. Es wird jedoch nicht die ursprüngliche Höhe der Servobrücke zum Boden erreicht, da ein Teil der anfänglich vorhandenen Energie  $E_{pot}$  durch Reibung „verlorengegangen“ ist. Ursache dafür, dass die Bewegung des Ovaloids nicht bei einer Rotation von  $90^\circ$  stoppt, ist dessen Trägheit. Der Ovaloid verharrt in seiner Bewegung, solange keine äußere Kraft auf ihn einwirkt. Am Punkt der geringsten  $E_{pot}$  wirkt auf ihn keine Kraft in Bewegungsrichtung. Erst nach  $90^\circ$  wirkt durch  $F_g$  in  $MMP_{SB}$  ein Moment, welches die Bewegung hemmt.

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz e - h**

Ausgehend von der Position des Ovaloids in Bild d hat sich der Ovaloid in Bild e bereits um ca.  $60^\circ$  vom Betrachter wegbewegt. Die Servobrücke befindet sich bzgl. des Bodens

unterhalb der Rotationsachse. Disk(2) ist einige Grad entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt, wohingegen Disk(1) nicht bzw. lediglich minimal ausgelenkt ist. Eine exakte Position ist auf dem Bild nicht zu erkennen. Während der folgenden Bildsequenz wird Disk(1) entgegen und Disk(2) im Uhrzeigersinn ausgelenkt, wodurch sich der Abstand der Auflagepunkt beider Disks auf dem Boden verkürzt. Gleichzeitig vergrößert sich der Abstand der Servobrücke zum Boden und der Ovaloid bewegt sich vom Betrachter weg. Die Bewegungsabfolge ist mit Bild h beendet. Die Lage des Ovaloids entspricht in etwa der Lage zu Beginn des Versuchs (vgl. Bild a), wobei Disk(1) minimal entgegen des Uhrzeigersinns und Disk(2) minimal im Uhrzeigersinn ausgelenkt ist.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz e - h**

Der Ovaloid befindet sich in einer rotierenden Bewegung vom Betrachter weg. Die Servobrücke und damit der  $MMP_{SB}$  befinden sich, wie in Bild e dargestellt, unterhalb der Rotationsachse, wodurch in Folge der im  $MMP_{SB}$  angreifenden Gewichtskraft in G1 ein negatives und in G2 ein positives Moment wirkt. Hinzu kommt ein weiteres Moment, welches in den Gelenken G1 und G2 wirkt und durch die in den  $MMP_{Disk(1)}$  und  $MMP_{Disk(2)}$  angreifende Gewichtskraft hervorgerufen wird. In Folge der Auslenkung der Disks bzgl. ihrer senkrechten Position zum Boden entsteht ein wirksamer Hebelarm zwischen Auflagepunkt der Disk(1) bzw. Disk(2) und dem jeweiligen  $MMP_{Disk(1)}$  bzw.  $MMP_{Disk(2)}$ . Das Produkt aus wirksamem Hebelarm und Gewichtskraft erzeugt in G1 ein negatives und in G2 ein positives Moment. Die entsprechende Winkeländerung wird mittels CSL des jeweiligen Gelenks erkannt und es erfolgt eine entsprechende Gegenregelung durch CSL, so dass für Disk(1) ein Drehmoment entgegen des Uhrzeigersinns und für Disk(2) im Uhrzeigersinn erzeugt wird. Dies hat zur Folge, dass sich der Abstand der Auflagepunkte beider Disks zueinander verringert, wodurch der Abstand zwischen Servobrücke und Boden vergrößert wird, so dass sich der Abstand zwischen  $MMP_{SB}$  und Rotationsachse und damit das Moment, welches zuvor die Bewegung des Ovaloids eingeleitet hat, weiter verringern (vgl. Bild f).

Noch während sich der Ovaloid vom Betrachter wegbewegt, erreicht der Abstand zwischen  $MMP_{SB}$  und Rotationsachse in Bild g nahezu Null und auch die Disks befinden sich in nahezu senkrechter Position zum Boden, sodass kein Moment auf die Rotationsachse wirkt. Der „Schwung“ als Folge der Trägheit ist ausreichend, damit sich der Ovaloid weiter zu der in Bild h dargestellten Position vom Betrachter fortbewegen kann. In Folge der Bewegung des Ovaloids vom Betrachter weg wird das in den Gelenken G1 und G2 wirksame Moment kontinuierlich geringer, da der wirksame Hebelarm zwischen  $MMP_{SB}$  und Rotationsachse aufgrund der Rotation geringer wird. Die Gegenregelung durch CSL führt zu einer Auslenkung von Disk(1) entgegen des Uhrzeigersinns und von Disk(2) im Uhrzeigersinn, während die Servobrücke bzgl. der Rotationsachse vom Betrachter weg ausgelenkt ist (vgl. Bild h). An dieser Stelle ist der Versuch beendet. Würde der Versuch weitergeführt werden, würde sich der Ovaloid aufgrund der Stellung der Disks und der Lage der Servobrücke bzgl. der Rotationsachse weiterhin vom Betrachter fortbewegen.

## 6.4 Bewegungsanalyse des Ovaloids - Aufstehbewegung

Die Ausgangsposition des Ovaloids, der Bodenbelag sowie die Werte der CSL-Parameter  $g_i$  und  $g_f$  sind identisch zum vorangegangenen Versuch. Die Servoantriebe in den Gelenken G1 und G2 sind aktiv und werden mittels separaten CSLs angesteuert, so dass sie unabhängig voneinander arbeiten.

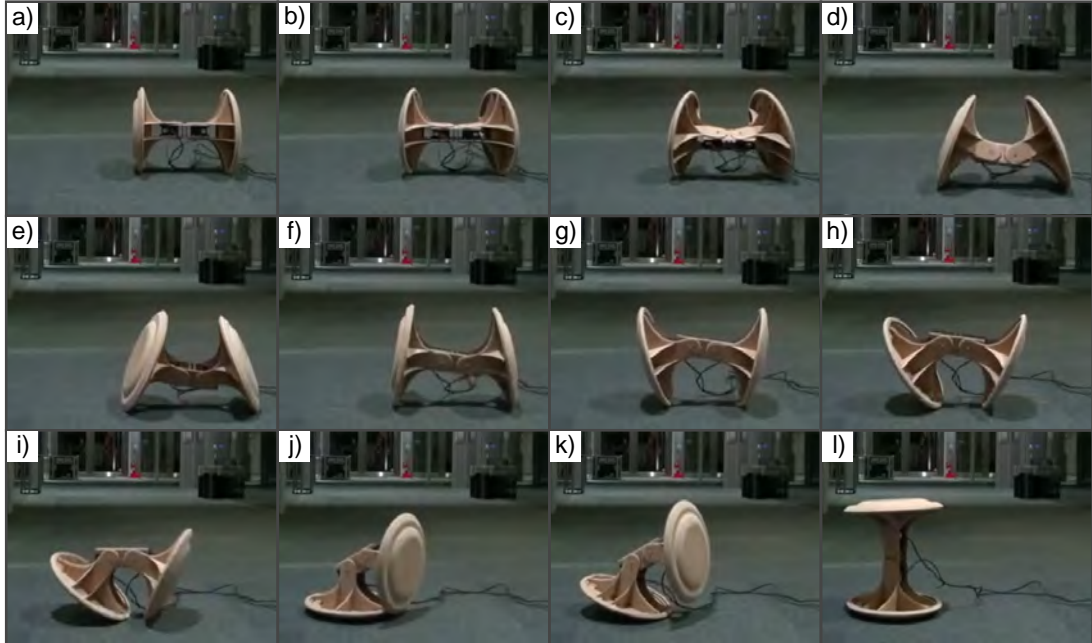


Abbildung 6.5: Die Bewegungssequenz zeigt zunächst die Rotationsbewegung des Ovaloids auf dem Boden. Anschließend erfolgt eine Aufstehbewegung und der Ovaloid kommt auf der Außenseite von Disk(1) zum aufrechten Stand.

### Bewegungsbeschreibung Bildsequenz a - e

In der Ausgangsposition ist Disk(2) bereits entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt, wobei Disk(1) nicht ausgelenkt ist. In der folgenden Bewegungssequenz werden zunächst Disk(1) im Uhrzeigersinn und Disk(2) entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt, wodurch sich die Disks zum Betrachter hin öffnen. Daraufhin rotiert der Ovaloid dem Betrachter entgegen, wobei er eine Drehung um seine Rotationsachse von ca.  $120^\circ$  absolviert. Der Winkel der Rotation ist der Positionsänderung der Servobrücke von Bild a zu Bild e entnommen.

### Funktionsbeschreibung Bildsequenz a - e

Die Ausgangsposition sowie die oben beschriebene Bewegungssequenz des Ovaloids entsprechen der Ausgangsposition und Sequenz in Kapitel 6.3. Da diese Bewegungssequenz und die entsprechende Funktionsbeschreibung bereits ausführlich in Kapitel 6.3

analysiert wurde, wird sie an dieser Stelle nicht wiederholt.

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz f - j**

Bisher bewegte sich der Ovaloid auf den Betrachter zu. Von der in Bild e dargestellten Position ausgehend, bewegt sich der Ovaloid nun mit einer Drehung von ca.  $30^\circ$  vom Betrachter weg. Gleichzeitig werden Disk(1) entgegen des Uhrzeigersinns und Disk(2) im Uhrzeigersinn ausgelenkt, sodass der Ovaloid die in Bild f dargestellte Position einnimmt und im Folgenden keine Rotation des Ovaloids mehr auftritt. Während Disk(1) weiterhin entgegen des Uhrzeigersinns und Disk(2) im Uhrzeigersinn ausgelenkt werden, verringert sich der Abstand der Auflagepunkte der beiden Disks auf dem Boden zueinander, wobei der Auflagepunkt von Disk(2) über den Boden nach links in Richtung Disk(1) bewegt wird und der Auflagepunkt von Disk(1) sich im Bezug zum Boden kaum verändert (vgl. Bild h). In Folge der fortschreitenden Bewegung beider Servoantriebe und damit beider Disks befindet sich der  $MMP_{SB}$  in etwa über dem Auflagepunkt von Disk(1), während sich der Auflagepunkt von Disk(2) rechtsseitig vom  $MMP_{SB}$  befindet (vgl. Bild i). Der Ovaloid kippt über den Auflagepunkt von Disk(1) und fällt auf die abgeflachte äußere Seite von Disk(1). Disk(2) berührt nicht mehr den Boden. Eine Winkeländerung beider Disks ist während des Umkippens nicht erkennbar und der Ovaloid nimmt die in Bild j dargestellte Position ein.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz f - j**

Ausgehend von der Position des Ovaloids in Bild e befindet sich der Ovaloid in einer rotierenden Bewegung vom Betrachter weg. Die Servobrücke und somit auch der  $MMP_{SB}$  befinden sich unterhalb der Rotationsachse. In Folge der im  $MMP_{SB}$  angreifenden Gewichtskraft wirkt in G1 ein negatives und in G2 ein positives Moment. Die Winkeländerung wird durch das jeweilige CSL erfasst und führt zu einer Änderung der Ausgangsspannung  $u(t)$ , so dass in G1 ein positives Drehmoment und in G2 ein negatives Drehmoment erzeugt wird. Aufgrund der Drehmomente in den Gelenken G1 und G2 verkürzt sich der Abstand der Disks auf dem Boden, wobei sich beide Disks aufeinander zubewegen und die Servobrücke und damit der  $MMP_{SB}$  über die Rotationsachse ausgelenkt wird (vgl. Abb. Bild g).

Wie in 6.2 erläutert, ist die Position des Ovaloids ab Bild g die Grundlage für eine Rollbewegung, da durch die Verschiebung des  $MMP_{SB}$  aus der Rotationsachse heraus ein wirksamer Hebelarm entsteht und damit ein Moment in der Achse wirken kann. Es kommt in diesem Fall jedoch nicht zu einer weiteren Rotation, da sich der  $MMP_{SB}$  nahezu senkrecht über der Rotationsachse befindet und daher nur ein sehr geringes Moment in der Rotationsachse wirkt. Das in der Rotationsachse wirksame Moment ist kleiner als das Haltemoment, das durch die Kombination von Teppichboden und Gewichtskraft des Ovaloids hervorgerufen wird und somit eine Rotation des Ovaloids verhindert wird.

Während Disk(1) in Folge des durch CSL hervorgerufenen Drehmoments weiterhin entgegen des Uhrzeigersinns und Disk(2) im Uhrzeigersinn bewegt wird, verringert

sich der Abstand der Auflagepunkte der Disks auf dem Boden. Disk(1) verharrt in ihrem Auflagepunkt, während Disk(2) in Richtung Disk(1) bewegt wird (vgl. Bild g - i). Der Grund für diese unterschiedliche Bewegung der Disks ist die differierende Gewichtsverteilung in den Auflagepunkten beider Disks aufgrund der asymmetrischen Auslenkungswinkel. Wäre die Gewichtsverteilung in beiden Auflagepunkten identisch, würden sich beide Auflagepunkte bzgl. des Bodens bewegen.

Der Auslenkungswinkel von Disk(1) ist im Gegensatz zu Disk(2) deutlich größer (vgl. Bild g - i). Dies hat zur Folge, dass der wirksame Hebelarm zwischen  $MMP_{Disk(1)}$  und Auflagepunkt Disk(1) größer ist als der wirksame Hebelarm zwischen  $MMP_{Disk(2)}$  und Auflagepunkt Disk(2). Daher ist auch das im Auflagepunkt Disk(1) wirkende positive Moment  $M_{Disk(1)}$  größer als das im Auflagepunkt Disk(2) wirkende negative Moment  $M_{Disk(2)}$  und die Gewichtsverteilung ist zugunsten Disk(1) verschoben. Somit ist die Haftreibung zwischen Teppich und Disk(1) größer als zwischen Teppich und Disk(2). Für die Überwindung der Haftreibung und Überführung in eine Gleitreibung wird bei Disk(2) weniger Kraft benötigt, wodurch nur Disk(2) auf dem Boden bewegt wird.

In der in Bild i dargestellten Position des Ovaloids hat sich, aufgrund des durch CSL hervorgerufenen Drehmoments in G1 und G2, der Abstand der Auflagepunkte von Disk(1) und Disk(2) stark verringert und der Abstand des  $MMP_{SB}$  zur Rotationsachse ist sehr groß.  $MMP_{Disk(1)}$  bewirkt in Verbindung mit seinem wirksamen Hebelarm im Auflagepunkt von Disk(1) ein positives Moment,  $MMP_{Disk(2)}$  für Disk(2) ein negatives Moment, wobei für den Betrag der Momente gilt:  $M_{Disk(1)} > M_{Disk(2)}$ . Zusätzlich hat die Asymmetrie der Auslenkungswinkel zur Folge, dass sich  $MMP_{SB}$  direkt über bzw. sogar linksseitig des Auflagepunktes von Disk(1) befindet, so dass für den Betrag der Momente gilt:  $M_{Disk(1)} + MMP_{SB} > M_{Disk(2)}$ . Der Ovaloid kippt daher über den Auflagepunkt von Disk(1) und fällt auf die abgeflachte Seite von Disk(1).

### **Bewegungsbeschreibung Bildsequenz k - l**

Ausgehend von der in Bild j dargestellten Position, in der der Ovaloid auf der abgeflachten äußere Seite von Disk(1) steht, werden Servobrücke und Disk(2) entgegen des Uhrzeigersinns bewegt, so dass Disk(2) angehoben wird und der Auflagepunkt von Disk(2) den Boden nicht mehr berührt. Während dieser Bewegung hebt Disk(1) linksseitig vom Boden ab. Die Servobrücke und Disk(2) werden weiterhin entgegen des Uhrzeigersinns bewegt und Disk(1) fällt zurück auf die abgeflachte Seite. Die Bewegung der Servobrücke und Disk(2) entgegen des Uhrzeigersinns wird fortgesetzt, bis sich beide in einer senkrechten Position befinden und der Versuch endet (vgl. Bild l). In dieser Position verharrt der Ovaloid.

### **Funktionsbeschreibung Bildsequenz k - l**

Unmittelbar nach dem Umkippen wirkt in G2 in Folge der im  $MMP_{Disk(1)}$  angreifenden Gewichtskraft ein negatives Moment. Die Winkeländerung wird mittels CSL erkannt und ein positives Drehmoment am Servoantrieb erzeugt, so dass Disk(2) entgegen des Uhrzeigersinns bewegt wird und beginnt sich aufzurichten. Gleichzeitig wirkt

in G1 ebenfalls ein negatives Moment, da  $MMP_{SB}$  und  $MMP_{Disk(2)}$  rechtsseitig bzgl. der Senkrechten durch G1 liegen, somit zwischen den jeweiligen Massenmittelpunkten und G1 ein wirksamer Hebelarm vorhanden ist und in Kombination mit der in den Massenmittelpunkten angreifenden Gewichtskraft jeweils ein negatives Moment in G1 erzeugen. Die Winkeländerung wird durch CSL erkannt und es erfolgt eine entsprechende Gegenregelung, so dass am Servoantrieb ein positives Drehmoment erzeugt wird. Da Disk(1) auf dem Boden aufliegt, bewegt sich anstelle von Disk(1) die Servobrücke entgegen des Uhrzeigersinns. Solange Disk(1) plan auf dem Boden aufliegt, wird der Auflagepunkt im geometrischen Mittel der Disk angesehen. Während die Servobrücke und Disk(2) in Folge der Servoansteuerung mittels CSL entgegen des Uhrzeigersinns bewegt werden, hebt sich Disk(1) linksseitig vom Boden ab. Die Ursache für das Abheben von Disk(1) vom Boden ist das im Auflagepunkt von Disk(1) wirkende negative Moment, welches durch die im  $MMP_{SB}$  und im  $MMP_{Disk(2)}$  wirkende Gewichtskraft sowie den dazugehörigen Hebelarmen verursacht wird, so dass für die Beträge der Momente gilt:  $M_{Disk(1)} < M_{SB} + M_{Disk(2)}$ .

Sobald sich Disk(1) linksseitig vom Boden abhebt, verschiebt sich der Auflagepunkt in Richtung des rechten Rands. Dadurch ändert sich das wirksame Moment im Auflagepunkt von Disk(1). In Folge der Verschiebung des Auflagepunkts befindet sich nur noch  $MMP_{Disk(2)}$  rechtsseitig von der Senkrechten durch den Auflagepunkt und erzeugt dort somit ein negatives Moment.  $MMP_{SB}$  befindet sich linksseitig bzgl. der Senkrechten durch den Auflagepunkt von Disk(1) und erzeugt somit ein positives Moment  $M_{SB}$  im Auflagepunkt von Disk(1). Zusätzlich wirkt ein weiteres positives Moment  $M_{Disk(1)}$ , da sich der  $MMP_{Disk(1)}$  durch die Verschiebung des Auflagepunkts ebenfalls linksseitig bzgl. der Senkrechten durch den Auflagepunkt befindet. Da sich der Kippwinkel zunächst nicht ändert, ist die Summe der Momente Null und für die Beträge der Momente gilt:  $M_{Disk(1)} + M_{SB} \approx M_{Disk(2)}$ .

Während sich der Ovaloid in der beschriebenen gekippten Position befindet, wirkt in Folge der Auslenkung der Servobrücke und Disk(2) in den Gelenken G1 und G2 nach wie vor ein negatives Moment. Disk(2) und die Servobrücke werden aufgrund des erzeugten Drehmoments durch CSL weiterhin entgegen des Uhrzeigersinns bewegt. In Folge dieser Bewegung wird der wirksame Hebelarm zwischen  $MMP_{Disk(2)}$  und dem Auflagepunkt von Disk(1) geringer, so dass auch das negative Moment  $M_{Disk(2)}$ , welches im Auflagepunkt von Disk(1) wirkt, geringer wird. Disk(1) fällt zurück auf die abgeflachte Seite, wenn für die Beträge der Momente gilt:  $M_{Disk(1)} + M_{SB} > M_{Disk(2)}$ . In dem Augenblick, in dem der Ovaloid wieder auf der abgeflachten Seite von Disk(1) steht, sind sowohl die Servobrücke als auch Disk(2) noch minimal entgegen des Uhrzeigersinns ausgelenkt, d.h. in den Gelenken G1 und G2 wirkt nach wie vor ein negatives Moment. Die damit verbundene Winkeländerung wird durch CSL des jeweiligen Gelenks erkannt und es erfolgt eine entsprechende Gegenregelung, so dass Servobrücke und Disk(2) so lange entgegen des Uhrzeigersinns bewegt werden, bis sich beide in einer senkrechten Position befinden.



## 6.5 Zusammenfassung

Wie in Kapitel 6.2 erläutert, liegt die Ursache für eine Rotationsbewegung des Ovaloids im Wirken eines Moments in der Rotationsachse. Dafür muss ein wirksamer Hebelarm zwischen  $MMP_{SB}$  und Rotationsachse vorhanden sein.

Es ist kein wirksamer Hebelarm vorhanden, wenn die Bewegungsebene der Servoantriebe orthogonal zur Wirkrichtung der im  $MMP_{SB}$  angreifenden Gewichtskraft liegt, somit keine Winkeländerung in den Gelenken auftritt und daher auch keine Ansteuerung der Servoantriebe mittels CSL erfolgt. Ein wirksamer Hebelarm zwischen  $MMP_{SB}$  und Rotationsachse ist auch dann nicht vorhanden, wenn die Bewegungsebene der Servoantriebe in der gleichen Ebene wie die Wirkrichtung der Gewichtskraft liegt, so dass zwar eine Winkeländerung in den Gelenken auftritt und daher auch eine Ansteuerung der Servoantriebe mittels CSL erfolgt, die Servobrücke sich jedoch senkrecht oberhalb oder unterhalb der Rotationsachse befindet und somit wiederum kein Moment in der Rotationsachse erzeugt.

Die ovale Form der Disks und die versetzte Anordnung zueinander haben zur Folge, dass lediglich vier Positionen des Ovaloids existieren, in denen er stabil steht. Die Tabelle 6.1 zeigt die vier stabilen Positionen des Ovaloids inkl. der Symmetrieachsen der Disks, die mit  $S_{Disk(1)}$  und  $S_{Disk(2)}$  gekennzeichnet sind. Würde sich der Ovaloid in einer dieser vier Positionen befinden und sich die Bewegungsebene der Servoantriebe entweder orthogonal oder in der gleichen Ebene wie die Wirkrichtung der im  $MMP_{SB}$  angreifenden Gewichtskraft liegen, so würde wiederum keine Moment in der Rotationsachse wirken. Daher ist neben der ovalen Formen und der versetzten Anordnung der Disks auch die Anordnung der Bewegungsebene der Servoantriebe bzgl. der Disks entscheidend. Die Ausrichtung der Bewegungsebene der Servoantriebe muss so erfolgen, dass in den stabilen Positionen die Bewegungsebene weder orthogonal zur wirkenden Gewichtskraft noch in der gleichen Ebene mit dieser liegt (vgl. Tabelle 6.1). Mit Berücksichtigung des Winkels zwischen Disks und Servobrücke ist sichergestellt, dass, wenn der Ovaloid in einer stabilen Positionen verharrt, immer ein Moment in den beiden Gelenken wirkt und somit eine Winkeländerung stattfindet. Als Folge werden die Servoantriebe durch CSL angesteuert, der Abstand zwischen  $MMP_{SB}$  und Rotationsachse vergrößert und damit die Grundlage für ein Moment in der Rotationsachse geschaffen.

Die schlängelnde Bewegung des Ovaloids kommt folgendermaßen zustande. Die Verwendung von Ovalen hat zur Folge, dass sich während der Rotation des Ovaloids die lotrechten Abstände zwischen Rotationsachse und den Auflagepunkten von Disk(1) und Disk(2) permanent ändern. Somit bewegt sich die Rotationsachse während der Bewegung des Ovaloids nicht nur horizontal, sondern zusätzlich vertikal auf und ab. Da die Disks mit einem Versatz der Symmetrieachsen von  $60^\circ$  zueinander angebracht sind, ändern sich die Abstände zwischen Rotationsachse und den Auflagepunkten der Disks nicht gleichmäßig, sondern ebenfalls versetzt zueinander (vgl. Tabelle 6.1). Dadurch verändert sich der Winkel der Rotationsachse in sowohl horizontaler als auch vertikaler Ebene. Der jeweils geringere Abstand hat zur Folge, dass der Ovaloid in seiner Bewegung kurzzeitig auf eine Kreisbahn gezwungen wird. Der Mittelpunkt dieser

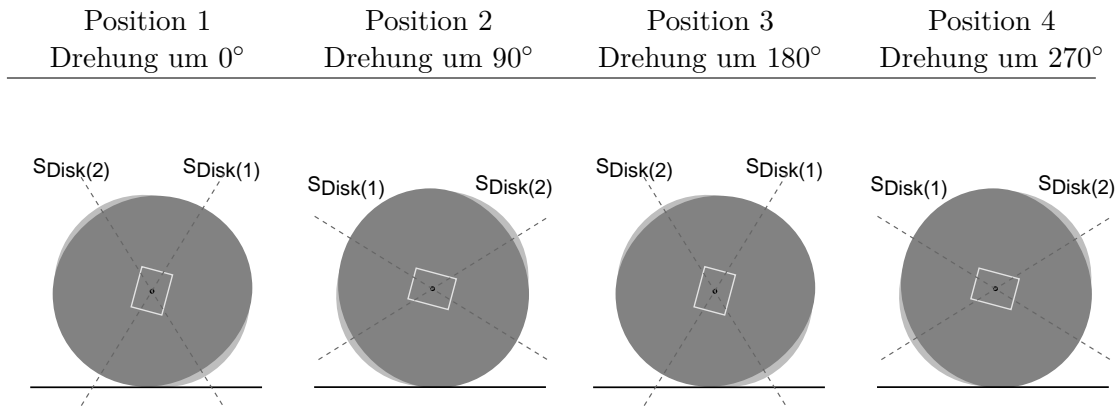


Tabelle 6.1: Die Tabelle zeigt die vier stabilen Positionen des Ovaloids inkl. der Lage der Servobrücke.  $S_{Disk(1)}$  bezeichnet die Symmetrieachse von Disk(1), die im Vordergrund abgebildet ist.  $S_{Disk(2)}$  bezeichnet die Symmetrieachse von Disk(2), die im Hintergrund abgebildet ist.

Kreisbahn befindet sich auf der Seite mit dem geringeren Abstand. Durch die Bewegung des Ovaloids hat jede Disk abwechselnd den kürzeren Abstand zwischen Rotationsachse und Auflagepunkt, so dass sich der Ovaloid daher in einer schlängelnden Bewegung fortbewegt.

Die Rotationsbewegung geht in eine Aufstehbewegung über, sobald sich der Gesamtmassenmittelpunkt des Ovaloids, der sich aus  $MMP_{SB}$ ,  $MMP_{Disk(1)}$  und  $MMP_{Disk(2)}$  zusammensetzt, sich nicht mehr zwischen den beiden Disks befindet, sondern außerhalb einer der Auflagepunkte der Disks liegt. Damit ist das Kippmoment größer als das Standmoment, so dass der Ovaloid über den Auflagepunkt kippt. Sobald eine der Disks auf ihrer Aussenseite liegt, wirkt aufgrund der im  $MMP_{SB}$  und im Massenmittelpunkt der anderen Disk angreifenden Gewichtskraft in den Gelenken G1 und G2 ein Moment. Die entsprechende Winkeländerung wird mittels CSL erkannt und es erfolgt eine entsprechende Gegenregelung. Diese Gegenregelung wird solange fortgesetzt, bis sich  $MMP_{SB}$  und der Massenmittelpunkt der Disk, die nicht auf dem Boden aufliegt, oberhalb des Drehpunktes von G1 bzw. G2 befinden, die Kraftwirkungslinie somit durch die Drehachsen verläuft und daher kein Moment in G1 und G2 wirkt. Der Ovaloid verbleibt in dieser aufrechtstehenden Position.

## 6.6 Betrachtung der Morphologie

Im Folgenden wird das Rotationsverhalten des Ovaloids unter dem Aspekt der Änderung der Morphologie der Disks analysiert. Die Variation der Morphologie besteht darin, dass die ovale Form der Disks durch einen Kreis, eine Ellipse sowie ein Quadrat ersetzt wird. Ellipse und Quadrat werden ohne und mit Versatz von  $90^\circ$  bzw.  $45^\circ$  betrachtet. Der Durchmesser bzw. die Größe der jeweiligen Variation unterscheidet sich nicht zwischen Disk(1) und Disk(2).

Die Auswertung erfolgt hinsichtlich drei verschiedener Kriterien. Das erste Kriterium ist die Bewegungsform des Ovaloids, wobei zwischen geradliniger, kreisförmiger und schlängelnder Bewegung unterschieden wird. Das zweite Kriterium betrifft das erforderliche Rotationsmoment in der Rotationsachse. Unter dem Rotationsmoment ist das Moment zu verstehen, welches durch Auslenkung des  $MMP_{SB}$  auftritt und ein Moment in der Rotationsachse verursacht. Dabei ist der wirksame Hebelarm zwischen  $MMP_{SB}$  und Rotationsachse orthogonal zur wirkenden Gewichtskraft von Bedeutung. Das dritte Kriterium bezieht sich auf die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  der Rotationsachse. Unter dem Aspekt der Bewegung des Ovaloids auf einer Oberfläche ist die Winkelgeschwindigkeit ein Maß für die Änderung der Position des Ovaloids in einem bestimmten Zeitintervall. Zur Darstellung werden Zeitverlaufdiagramme verwendet. Da die Betrachtung theoretischer Natur ist, kommen keine Einheiten für Winkelgeschwindigkeit und Zeit zur Anwendung. Somit ist ein Vergleich des Zeitverhaltens der verschiedenen Morphologien nur bedingt möglich.

Für alle Aspekte gilt, dass die nachfolgend angegebenen Parameter und Grafiken auf Abschätzungen basieren. Für exakte Daten müssten entweder Simulationen oder Experimente durchgeführt werden. Exakte Daten sind jedoch für eine Bewertung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Morphologien nur bedingt erforderlich. Im Vordergrund steht der Vergleich. Die Ausrichtung der Bewegungsebene der Servoantriebe wird so angenommen, dass immer ein Moment wirkt und CSL darauf reagieren kann. Der Untergrund wird als waagrecht und glatt angenommen. Darüber hinaus wird bei der Betrachtung ein idealisierter Bewegungsablauf angenommen, d.h. sowohl Reibung als auch Trägheit des Ovaloids werden vernachlässigt.

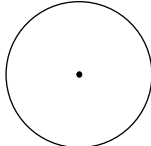
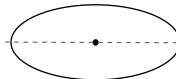
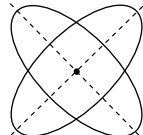
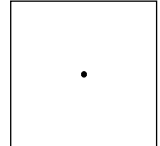
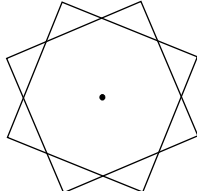
Kreis	Ellipse mit $0^\circ$ Versatz	Ellipse mit $90^\circ$ Versatz	Quadrat mit $0^\circ$ Versatz	Quadrat mit $45^\circ$ Versatz
				
keine stabile Position	zwei stabile Positionen	vier stabile Positionen	vier stabile Positionen	acht stabile Positionen

Tabelle 6.2: Morphologievarianten des Ovaloids

Je nach Morphologievariante ergibt sich eine unterschiedliche Anzahl von stabilen Positionen. Ein Kreis hat keine stabile Position, d.h. der Ovaloid kann sich somit bei jedem Drehwinkel in Ruhe befinden. Eine Ellipse ohne Versatz der Hauptachsen zueinander weist zwei stabile Positionen auf. Eine Ellipse mit Versatz von  $90^\circ$  sowie ein Quadrat ohne Versatz weisen vier stabile Positionen auf. Ein Quadrat mit Versatz von  $45^\circ$  weist acht stabile Positionen auf (vgl. Tabelle 6.2).

Die Morphologie der Disks hat einen entscheidenden Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Ovaloids. Jede Morphologievariante hat ein charakteristisches Verhalten zur Folge, auf das im Folgenden eingegangen wird. In der Tabelle 6.3 sind die Ergebnisse bzgl. der drei verwendeten Kriterien von jeder Morphologievariante zusammengefasst dargestellt.

Morphologie	Bewegungsform	Rotationsmoment	Winkelgeschwindigkeit
Kreis	geradlinig	gering	gering
Ellipse mit $0^\circ$ Versatz	geradlinig	hoch	stark schwankend, große Amplitude
Ellipse mit $90^\circ$ Versatz	schlängelnd	mittel	stark schwankend, mittlere Amplitude
Quadrat mit $0^\circ$ Versatz	keine Bewegung	maximal	keine
Quadrat mit $45^\circ$ Versatz	geradlinig	gering - mittel	stark schwankend, mittlere Amplitude

Tabelle 6.3: Gegenüberstellung der Morphologievarianten anhand der drei Kriterien: Bewegungsform, Rotationsmoment und Winkelgeschwindigkeit.

Morphologievariante Kreis:

Aufgrund der Geometrie der Laufflächen existiert keine stabile Position, d.h. der Ovaloid kann prinzipiell bei jedem Drehwinkel zur Ruhe kommen. Um den Ovaloid in Rotation zu versetzen, ist ein geringes Rotationsmoment erforderlich, d.h. es ist nur ein kleiner Abstand zwischen  $MMPSB$  und Rotationsachse orthogonal zur Wirkrichtung der Gewichtskraft für die Erzeugung eines Moments in der Rotationsachse erforderlich. Ein geringes Moment hat eine geringe Winkelbeschleunigung damit auch eine geringe Winkelgeschwindigkeit zur Folge. Da keine stabilen Positionen eingenommen werden können, erreicht die Winkelgeschwindigkeit jedoch nicht Null (vgl. Abb. 6.6). Der Ovaloid bewegt sich geradlinig auf der Oberfläche, da die lotrechten Abstände zwischen Rotationsachse und dem jeweiligen Auflagepunkt der Disks gleich groß sind, d.h. das Verhältnis der Abstände ist konstant 1.

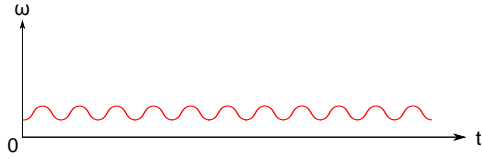


Abbildung 6.6: Zeitverlaufdiagramm der Morphologievariante Kreis.

Morphologievariante Ellipse:

Aus der Geometrie der Laufflächen ergeben sich zwei stabile Positionen. Die Hauptachsen der Ellipsen befinden sich parallel zur Oberfläche. Damit der Ovaloid von einer stabilen Position in die nächste überführt werden kann, muss ein großes Moment aufgebracht werden. Dabei wird der Gesamtmassenmittelpunkt des Ovaloids angehoben, d.h. der Abstand zwischen Oberfläche und Gesamtmassenmittelpunkt vergrößert sich und die potentielle Energie nimmt zu. Der Zeitverlauf von  $\omega$  weist zunächst einen langsamen Anstieg auf. Der Ovaloid wird bewegt und die Hauptachsen der Ellipsen nähern sich einer senkrechten Lage zur Oberfläche an. Sobald die Hauptachsen die senkrechte Lage passieren und der Abstand ein Maximum erreicht hat, erfährt der Ovaloid eine zusätzliche Beschleunigung, da die potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt wird und  $\omega$  nimmt sprunghaft zu (große Amplitude). Beim Erreichen der nächsten stabilen Position fällt  $\omega$  auf Null, und der Ablauf beginnt erneut (vgl. Abb. 6.7). Der Ovaloid bewegt sich geradlinig, d.h. das Verhältnis der lotrechten Abstände ist konstant 1.

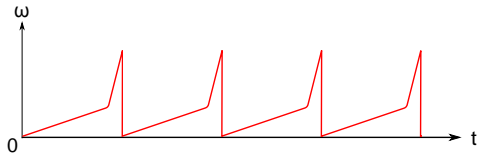


Abbildung 6.7: Zeitverlaufdiagramm der Morphologievariante Ellipse.

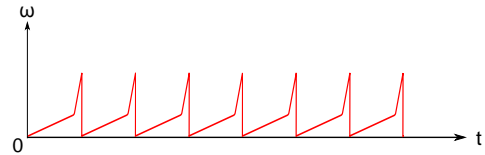


Abbildung 6.8: Zeitverlaufdiagramm der Morphologievariante Ellipse mit  $90^\circ$  Versatz.

Morphologievariante Ellipse mit  $90^\circ$  Versatz:

Als Folge des Versatzes von  $90^\circ$  ergeben sich vier stabile Positionen. Zur Überführung des Ovaloids in die nächste stabile Position wird nun ein mittleres Moment benötigt, da die erforderliche Anhebung des Gesamtmassenmittelpunkts kleiner ist und damit auch weniger potentielle Energie eingebracht werden muss. Der Verlauf der Winkelgeschwindigkeit ist vergleichbar mit der Ellipse ohne Versatz. Die maximale Winkelgeschwindigkeit (mittlere Amplitude) ist jedoch geringer, da der „Weg“ des Ovaloids zur nächsten stabilen Position kürzer und somit der Zeitabschnitt zur Beschleunigung geringer ist. Die Frequenz der Bewegung ist in etwa halb so groß wie bei der Ellipse ohne Versatz, da der Winkel zwischen den stabilen Positionen  $90^\circ$  anstatt  $180^\circ$  beträgt (vgl. Abb. 6.8). Im Vergleich zu den anderen Morphologievarianten ist die Bewegung

des Ovaloids schlängelnd, da sich die jeweiligen lotrechten Abstände zwischen Rotationsachse und den Auflagepunkten der Disks unterscheiden und sich ihr Verhältnis in Abhängigkeit des Drehwinkels des Ovaloids ändert.

Morphologievariante Quadrat:

Das Quadrat weist ebenfalls vier stabile Positionen auf. Aufgrund der wesentlich größeren Auflagepunkte, die in diesem Fall als Auflageflächen bezeichnet werden müssen, ist ein sehr großes Moment zur Bewegung des Ovaloids erforderlich. Die Auslenkung der Servobrücke und damit die Vergrößerung des Abstandes zwischen  $MMP_{SB}$  und Rotationsachse reichen jedoch nicht aus, um das erforderliche Moment aufzubringen (vgl. Abb. 6.9). Es kommt damit keine Bewegung zustande und die Winkelgeschwindigkeit bleibt Null.



Abbildung 6.9: Zeitverlaufdiagramm der Morphologievariante Quadrat.

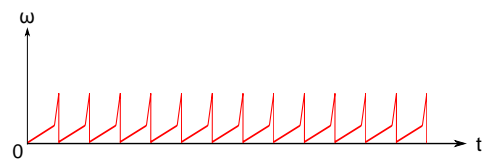


Abbildung 6.10: Zeitverlaufdiagramm der Morphologievariante Quadrat mit  $45^\circ$  Versatz.

Morphologievariante Quadrat mit  $45^\circ$  Versatz:

Diese Morphologievariante weist acht stabile Positionen auf und kommt damit dem Kreis am nächsten. Das erforderliche Rotationsmoment liegt vom Betrag zwischen Kreis und Ellipse mit  $90^\circ$  Versatz. Der Zeitverlauf ist geprägt durch zunächst langsam und anschließend sprunghaft ansteigende Winkelgeschwindigkeiten, die jedoch jeweils beim Erreichen der nächsten stabilen Position auf Null fallen. Die Amplitude der Winkelgeschwindigkeit ist geringer als bei der Ellipse mit  $90^\circ$  Versatz. Die Frequenz der Bewegung beträgt in etwa ein Viertel der Bewegungsfrequenz der Ellipse ohne Versatz, da der Winkel zwischen den stabilen Positionen  $45^\circ$  anstatt  $180^\circ$  beträgt (vgl. Abb. 6.10). Der Ovaloid bewegt sich geradlinig, da das Verhältnis der lotrechten Abstände konstant 1 beträgt.

Für eine gleichmäßige Bewegung des Ovaloids ist eine kreisförmige Morphologie der Disks am besten geeignet. Bereits mit geringen Auslenkungen der Disks und damit auch geringen Momenten kann der Ovaloid in Bewegung versetzt werden. Da bei einer kreisförmigen Morphologie keine stabilen Positionen existieren, kann die Winkelgeschwindigkeit im Vergleich zu anderen Morphologien nicht stark abfallen und damit die Bewegung des Ovaloids unter Umständen zum Erliegen bringen. Das Problem bei dieser Morphologie besteht darin, dass der Ovaloid eine Ruhelage einnehmen könnte oder sich bereits unmittelbar nach dem Einschalten der Servoantriebe in einer Position befindet, bei der entweder die Bewegungsebene der Servoantriebe orthogonal oder in

der gleichen Ebene wie die Wirkrichtung der Gewichtskraft liegt. In diesem Fall wirkt entweder in den Servoantrieben oder in der Rotationsachse kein Moment und es würde zu keiner Bewegung des Ovaloids kommen.

Als Kompromiss ließen sich Kreis und Ellipse kombinieren. Somit ist sichergestellt, dass der Ovaloid stabile Positionen einnimmt und unter Verwendung der versetzten Anordnung der Servobrücke ist gewährleistet, dass die Bewegungsebene der Servoantriebe bei Erreichen einer stabilen Position nicht orthogonal oder in der gleichen Ebene wie die Wirkrichtung der Gewichtskraft liegt (vgl. Kapitel 6.5). Bei der Kombination von Kreis und Ellipse sollte berücksichtigt werden, dass die Abweichung der Ellipse von der Kreisform möglichst gering ist aber dennoch stabile Positionen ermöglicht, d.h. das Verhältnis zwischen Hauptachse und Nebenachse sollte möglichst nah an 1 liegen. Unter diesem Aspekt ist die bisher verwendete ovale Form der Disks bereits optimal.

## 7 Fazit und Ausblick

Das Verhalten eines Roboters wird von drei grundlegenden Faktoren bestimmt: der Morphologie, der Umwelt und des Kontrollprogramms [7]. Sowohl die Morphologie als auch die Steuerung von beispielsweise einem Staubsaugerroboter ist eine andere als die einer Kaffeemaschine, da sich beide sowohl in ihrer Funktionalität als auch in der Umwelt, in der sie agieren, unterscheiden. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Roboter variieren hinsichtlich der Morphologie und Umwelt. Die Ansteuerung der Gelenke mittels Servoantrieben wird jedoch immer unter Verwendung von CSL im Contraction Mode realisiert. Trotz dieser einfachen Methode der Ansteuerung der Servoantriebe zeigen die analysierten Roboter komplexe Verhaltensweisen. Im Verlauf dieser Arbeit wurden die Verhaltensweisen der Roboter sowie der Einfluss ihrer Morphologie untersucht.

Zu diesem Zweck wurden die Roboter zunächst ohne zusätzliche Umwelteinflüsse betrachtet und ihr Verhalten analysiert, welches lediglich aus der Morphologie und der Ansteuerung der Servoantriebe resultiert. Anschließend wurden jeweils zwei Bewegungssequenzen eines Roboters gegenübergestellt und untersucht, inwiefern sich das Verhalten des Roboters verändert, wenn zusätzliche Einflüsse aus der Umwelt auf ihn einwirken. Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden verwendet, um eine theoretische Betrachtung zum Einfluss der Morphologieänderung auf das Verhalten durchzuführen. So wurde beispielsweise die Anordnung und/oder die Form der Segmente verändert sowie die vormals aktiven in passive Gelenke gewandelt und die Umweltbedingungen verändert. Anhand dieser Morphologie- und Umweltänderungen konnte zum einen gezeigt werden, wie sich die jeweiligen Modifikationen auf das Verhalten auswirken und zum anderen, welche Morphologievariante sich besonders gut oder schlecht eignet, um ein bestimmtes Verhalten hervorzurufen. Diese Erkenntnisse können für spätere Konstruktionen von Robotern genutzt werden.

Die in dieser Arbeit betrachteten Morphologieaspekte umfassen die Form und Anordnung der Segmente der Roboter, die damit im Zusammenhang stehende Verschiebung der Lage der Massenmittelpunkte und die Wandlung eines vormals aktiven in ein passives Gelenk. Der Aspekt des Materials, aus dem der Roboter besteht, wurde nicht berücksichtigt, da alle untersuchten Roboter aus identischem Material aufgebaut sind. In einer weiterführenden Untersuchung kann dieser Aspekt Berücksichtigung finden, da sich bei der Verwendung unterschiedlicher Materialien die Masse und in Interaktion mit der Umwelt ggf. die Reibung ändern würde und somit eventuell ein anderes oder auch neues Verhalten erzeugt werden würde.

Wie eingangs erwähnt, basiert die Ansteuerung der Servoantriebe der untersuchten Roboter auf CSL im Contraction Mode. Unter diesem Aspekt könnten die Untersuchungen um eine Kombination verschiedener CSL-Modi erweitert werden, wie sie bereits im ABC-Framework für den Roboter Semmi Anwendung fand [4]. Darüber hinaus wäre



eine Untersuchung zum Einfluss der CSL-Parameter  $g_i$  und  $g_f$  auf das Verhalten sinnvoll, da diese wesentlich die Reaktionsgeschwindigkeit des Roboters prägen und unter Umständen zu einem anderen bzw. noch vielfältigerem Verhalten führen können.

# Literaturverzeichnis

- [1] BRAITENBERG, Valentino: Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology. In: *Fachbuchverlag Leipzig* (1986)
- [2] BROOKS, Rodney A.: Elephants Don't Play Chess. In: *Robotics and Autonomous Systems* 6, 1990, S. 3–15
- [3] BROOKS, Rodney A.: Intelligence Without Reason. In: *Computers and Thought (IJCAI-91)* (1991)
- [4] HILD, Manfred ; KUBISCH, Matthias: Self-Exploration of Autonomous Robots Using Attractor-Based Behavior Control and ABC-Learning. In: *11th Scandinavian Conference on Artificial Intelligence (SCAI 2011)* (2011)
- [5] KUBISCH, Matthias ; BENCKENDORFF, Christian ; HILD, Manfred: Balance Recovery of a Humanoid Robot Using Cognitive Sensorimotor Loops (CSLs). In: *14th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines* (2011)
- [6] NEHMZOW, Ulrich: Mobile Robotik: Eine praktische Einführung. In: *Springer-Verlag* (2002)
- [7] PFEIFER, Rolf ; BONGARD, Josh: How the body shapes the way we think : a new view of intelligence. In: *Cambridge, MA : MIT Press*, 2007
- [8] PFEIFER, Rolf ; SCHEIER, Christian: Understanding Intelligence. In: *Cambridge, MA : MIT Press*, 2001
- [9] ROBOTIS: *User manual: Dynamixel RX-28*. : Robotis, 2007
- [10] WERNER, Benjamin: *Entwicklung eines adaptiven sensomotorischen Algorithmus zur dynamischen Bewegungssteuerung autonomer Roboter*. : Institut für Informatik, Humboldt-Universität zu Berlin, 2013. – Diplomarbeit

# Abbildungsverzeichnis

2.1	CSL als Blockschaltbild . . . . .	8
2.2	Bewegungssteuerung eines Pendels im Contraction Mode . . . . .	10
3.1	Wippe . . . . .	12
3.2	Schematische Darstellung der Wippe . . . . .	12
3.3	Bewegungssequenz der Wippe mit zusätzlichem Umwelteinfluss (Kugel)	13
3.4	Bewegungssequenz der Wippe im gekippten Stand und mit zusätzlichem Umwelteinfluss (Kugel) . . . . .	17
4.1	Angler . . . . .	23
4.2	Schematische Darstellung des Anglers . . . . .	23
4.3	Grundlegender Bewegungsablauf des Anglers mit einem aktiven und einem starren Gelenk . . . . .	24
4.4	Grundlegender Bewegungsablauf des Anglers mit zwei aktiven Gelenken	25
4.5	Bewegungssequenz des Anglers mit Gummiband . . . . .	27
4.6	Bewegungssequenz des Anglers mit Seil . . . . .	31
4.7	Morphologievariante 1 des Anglers . . . . .	35
4.8	Morphologievariante 2 des Anglers . . . . .	38
4.9	Morphologievariante 3 des Anglers . . . . .	38
4.10	Morphologievariante 1 - Lage des Massenmittelpunkts bzgl. G1 . . . . .	39
4.11	Morphologievariante 2 - Lage des Massenmittelpunkts bzgl. G1 . . . . .	39
4.12	Morphologievariante 3 - Lage des Massenmittelpunkts bzgl. G1 . . . . .	40
5.1	Grundlegender Bewegungsablauf des Anglers mit passivem Gelenk G1 und aktivem Gelenk G2 . . . . .	42
5.2	Bewegungssequenz des Anglers mit G1 als passivem Gelenk . . . . .	44
5.3	Teilbewegung, bei der S3 über eine Oberfläche gezogen wird . . . . .	48
5.4	Teilbewegung, bei der der Standfuß über den Boden bewegt wird . . . . .	49
6.1	Ovaloid mit seitlicher Ansicht der Servobrücke. . . . .	51
6.2	Ovaloid mit Draufsicht der Servobrücke. . . . .	51
6.3	Grundlegende Schritte der Rotationsbewegung des Ovaloids . . . . .	53
6.4	Bewegungssequenz zur Rotationsbewegung des Ovaloids . . . . .	54
6.5	Bewegungssequenz zur Aufstehbewegung des Ovaloids . . . . .	57
6.6	Zeitverlaufdiagramm der Morphologievariante Kreis . . . . .	65
6.7	Zeitverlaufdiagramm der Morphologievariante Ellipse . . . . .	65
6.8	Zeitverlaufdiagramm der Morphologievariante Ellipse mit 90° Versatz .	65
6.9	Zeitverlaufdiagramm der Morphologievariante Quadrat . . . . .	66
6.10	Zeitverlaufdiagramm der Morphologievariante Quadrat mit 45° Versatz	66

# Tabellenverzeichnis

2.1	Verhaltensmodi CSL . . . . .	9
3.1	Rollverhalten der Kugel bei unterschiedlichen Krümmungen des Wippenarms . . . . .	20
6.1	Stabile Positionen des Ovaloids . . . . .	62
6.2	Morphologievarianten des Ovaloids . . . . .	63
6.3	Ovaloid - Gegenüberstellung der Eigenschaften verschiedener Morphologievarianten . . . . .	64

# Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Weiterhin erkläre ich, eine Diplomarbeit in diesem Studienggebiet erstmalig einzureichen.

Berlin, den 5. Oktober 2013

.....

## Statement of authorship

I declare that I completed this thesis on my own and that information which has been directly or indirectly taken from other sources has been noted as such. Neither this nor a similar work has been presented to an examination committee.

Berlin, 5. Oktober 2013

.....