

»Entwicklung eines sphärischen Roboters mit hoher
Manövrierfähigkeit«

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieurin / Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

Von **Vadym Bilous**

geb. am 21.11.1988 in Odessa, Ukraine

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau

der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: (akademischer Grad Vorname Name)

Prof. Dr.sc.techn. Ulrich Schmucker

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Arndt Lüder

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Palis

Promotionskolloquium am 14.12.2015

VORWORT

Diese Arbeit ist während meines Studiums als Doktorand an der der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF Magdeburg entstanden. Mein besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Schmucker für seine fachliche Betreuung der Arbeit sowie für die Anregungen und Ratschläge. Zudem gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Andriy Telesh für seine hilfreiche Unterstützung bei der Erstellung dieser Doktorarbeit. Ich möchte auch meinem Kollegen Herrn Tarik Mrech für seine Hilfe danken. Weiterhin möchte ich Herrn Dr. rer. nat. habil. Juri Tolujew für die Hilfe in theoretischen Fragen danken. Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Matthias Neitzel für seine wertvollen Ratschläge. Zudem bedanke ich mich bei meinen Kollegen am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF Magdeburg für die umfangreiche fachliche Unterstützung.

INHALTSVERZEICHNIS

Einführung	1
1. Stand der Technik, Zweck und Novität der Arbeit.....	3
1.1. Hauptvorteile und Einsatzbereiche der Kugelroboter	3
1.2. Zusätzliche Bauarten der Antriebsmechanismen der Kugelroboter	4
1.2.1. Bewegungsverfahren mit Hilfe der Verschiebung des Massenmittelpunkts.....	5
1.2.2. Bewegung des Kugelroboters durch die Verwendung des Drehimpulses des Kreisels	13
1.2.3. Bewegungsverfahren mit Hilfe der Hüllkugelverformung/ Hüllkugeltransformation.....	17
1.2.4. Fazit	18
1.3. Sphärische Sprungroboter.....	19
1.3.1. Problemstellung und der Stand der Technik	19
1.4. Technische Anforderungen an den in der Dissertation entwickelten Roboter	23
1.5. Forschungs- und Entwicklungsziele	24
1.6. Wissenschaftliche und Ingenieursnovität der Arbeit.....	25
2. Kinematisches Schema des Roboters mit EiNEM sphärischen Pendel und die Bewegungsgleichungen des Roboters	26
2.1. Hauptelemente des Roboters und seine Bewegungsverfahren	26
2.2. Sprungmechanismus	27
2.3. Kreiselgerät des Roboters	29
2.4. kinematische Schema des Roboters.....	31
2.5. Bewegungsgleichungen des Roboters auf einer gleichmäßig horizontalen Oberfläche	33
2.6. Spezifische Fälle der Bewegung des Kugelroboters	48
2.7. Bewegungsgleichungen des Roboters bei der Bewegung mit einem großen Neigungswinkel der Roboterrollebene	51
3. Modellierung und die Steuerungssystementwicklung des Roboters	64
3.1. MATLAB-Modell	64
3.2. Steuerungssystementwicklung.....	66
3.3. Simulierung der Roboterbewegung	67
3.4. Antriebsmomente der Roboter-elemente	73
3.4.1. Antrieb der Hauptbewegung des Roboters	74
3.4.2. Antrieb der Kreiselrahmen	74
3.4.3. Antrieb der Änderung der Hauptbewegungsrichtung.....	76
3.4.4. Antrieb des Zugsystems des Sprungmechanismus	76
3.5. Antriebsauswahl nach benötigten Parametern.....	77
3.6. Elektronik und Akkus des Roboters	79
3.6.1. Auswahl der Controller	80

4. Endvergleich der Roboter.....	82
4.1. Werkstoffe und Massen der Robotererelemente.....	82
4.2. Kreiselgerät und sphärisches Pendel	83
4.2.1. Kreiselgerät.....	83
4.2.2. Tragwerk des sphärischen Pendels und sein Aufbau.....	86
4.3. Äquatoriale Führung.....	90
4.4. Hauptbewegungsantrieb	93
4.5. Sprungmechanismus und Haupttragwerk.....	94
4.5.1. Zugmechanismus	94
4.5.2. Sprungmechanismus in der Montage und das Haupttragwerk	95
4.6. Hüllkugel des Roboters	97
4.7. Gesamtes Bauschema des Roboters	100
5. Name des Roboters.....	101
6. Montage des Roboters	102
6.1. Innerseitige Komponenten.....	102
6.2. Montage der Hüllkugel.....	103
6.3. Fertigstellung des Roboters	103
7. Experimente.....	104
7.1. Liste der Experimente.....	104
7.2. Ergebnisse der Experimente	105
7.2.1. Aufgabe 1: Bewegung des Roboters mit inaktivem Kreiselgerät.....	105
7.2.2. Aufgabe 2: Bewegung des Roboters mit aktivem Kreiselgerät.....	106
7.2.3. Aufgabe 3: Robotersprung	108
7.2.4. Aufgabe 5: krummlinige Bewegung des Roboters.....	108
7.2.5. Aufgabe 6: krummlinige Bewegung des Roboters.....	109
Fazit und mögliche Verbesserungen.....	111
Literatur	112

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Bild 1.1: Bewegungsverfahren des Kugelroboters mit Hilfe der Verschiebung des Massenmittelpunkts [4]	5
Bild 1.2: Laufkatze-Bauschema des Kugelroboters, der sich mit Hilfe der Massenmittelpunktverschiebung bewegt [4]	6
Bild 1.3: Schema des Kugelroboters mit dem federbelasteten inneren Bein [7].....	7
Bild 1.4: Schema der Mehrmassenverschiebung [4]	8
Bild 1.5: Schema des Roboters mit den halbsphärischen Rädern [4].....	9
Bild 1.6: Bauschema des Kugelroboters mit Ballastmassen auf einer starren Achse [4].....	10
Bild 1.7: Bauschema des Roboters mit den Ballastmassen auf einer beweglichen Achse [4]	11
Bild 1.8: Bauschema des Kugelroboters mit der Laufkatze, die mit Allseitenrädern ausgerüstet ist [17].....	12
Bild 1.9: Kinematisches Schema der Bewegung der Elemente des „Omicron“ [17].....	12
Bild 1.10: Kinematisches Schema des einaxialen Kreiselgeräts	13
Bild 1.11: Stabilisierung der Hauptbewegung des Roboters mit Hilfe des Kreiselgeräts [4] ..	14
Bild 1.12: Kombination des Kreiselrotors und des Pendels auf einer starren Achse [28]	15
Bild 1.13: Kinematisches Schema des doppelten Kreiselgeräts, das aus zwei einaxialen Kreiseln besteht	16
Bild 1.14: Mögliche Bewegungen von „KisBot I“ [3]	17
Bild 1.15: Schema der Roboterbewegung mit Hilfe der Hüllkugelverformung [3].....	18
Bild 1.16: Schema der Überwindung eines stufigen Hindernisses beim Kugelroboter [90]....	19
Bild 1.17: Roboter „JollBot“ [41].....	20
Bild 1.18: Phasen der Hüllkugelverformung des Roboters „JollBot“ und Änderung der Richtung der Zentralachse beim Sprung [41].....	21
Bild 1.19: Schema der Hauptbewegung und der Änderung der Bewegungsrichtung des Roboters „JollBot“ [41].....	21
Bild 1.20: Sphärischer Roboter mit einem Sprungmechanismus [3]	22
Bild 2.1: Prinzipielles Schema des Roboters	26
Bild 2.2: Prinzipielles Bauschema des Sprungmechanismus	28
Bild 2.3: Bauschema und kinematisches Schema des Schiffsstabilisators.....	29
Bild 2.4: Prinzipielles Schema der Kreiselanlage des Roboters.....	30
Bild 2.5: Kinematisches Schema des Roboters	31
Bild 2.6: Rollen des Rads mit dem flachen Pendel auf der horizontalen Ebene	33
Bild 2.7: Koordinatensysteme und die Projektionen der Vektoren der Geschwindigkeiten des Radmassenmittelpunkts.....	36
Bild 2.8: Vektoren der Geschwindigkeiten der Massenmittelpunkte des Rads und des Pendels.....	39
Bild 2.9: Kontaktpunkt des Rads P und Projektion des Radmassenmittelpunkts C.....	47

Bild 2.10: Roboter bewegt sich auf der geneigten Oberfläche.....	49
Bild 2.11: Schema des Roboters vor dem Hindernis (Stufe).....	50
Bild 2.12: Schema der Bewegung des Roboters bei einem großen Neigungswinkel der Roboterrollebene (Symmetrieebene) S.....	51
Bild 2.13: Schema der Positionierung der Schwerpunkte der Hüllkugel, des Pendels und der Kreisel	55
Bild 3.1: Strukturschema des MATLAB-Modells	64
Bild 3.2: MATLAB-Modell des Roboters.....	65
Bild 3.3: Struktur des Steuerungssystems des Roboters.....	66
Bild 3.4: Veränderung der Geschwindigkeit und der Beschleunigung des Roboters beim Beschleunigen und Bremsen [91].....	68
Bild 3.5: Veränderung des Drehwinkels des Kreiselrahmens	69
Bild 3.6: Veränderung der Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrahmens.....	69
Bild 3.7: Veränderung des Wellenmoments des Kreiselrahmens, wenn dieser Rahmen bei der Roboterbeschleunigung stillsteht	70
Bild 3.8: Drehwinkel des Kreiselrahmens bei Ansprechverzug des PID-Reglers	70
Bild 3.9: 2D-Trajektorie der Bewegung des Roboters	71
Bild 3.10: Drehwinkel des Pendels um die Achse X (Bild 2.5), abhängig von der Zeit.....	71
Bild 3.11: Drehgeschwindigkeit des Pendels, abhängig von der Zeit.....	71
Bild 3.12: Roboter überwindet die Stufe	72
Bild 3.13: Veränderung des Antriebsmoments für die Rahmendrehung.....	72
Bild 3.14: Veränderung des Drehwinkels des Kreiselrahmens	72
Bild 3.15: Veränderung der Winkelgeschwindigkeit der Rahmendrehung.....	73
Bild 3.16: Sprunghöhe des Roboters	73
Bild 3.17: Veränderung des Antriebsmoments der Hauptbewegung	74
Bild 3.18: Veränderung des Rahmendrehmoments.....	75
Bild 3.19: Veränderung des Kraftmoments des Antriebs der Änderung der Hauptbewegungsrichtung.....	76
Bild 3.20: Feder des Sprungmechanismus	76
Bild 3.21: Endschalter des Roboters	79
Bild 3.22: Controller Faulhaber Serie SC 5008S	80
Bild 3.23: Elektronik des Roboters	80
Bild 3.24: VISION-Akku	81
Bild 4.1: Bauarten des Kreisels	83
Bild 4.2: Schiffsstabilisator (Schlingerdämpfer).....	84
Bild 4.3: Bauschema des Kreisels	85
Bild 4.4: Kreisel.....	85
Bild 4.5: Kreiselrotoren und Kreiselrotorverformung.....	86

Bild 4.6: Spannungsdiagramm (a) und Verformungsdiagramm (b) des Rotors.....	86
Bild 4.7: Sphärisches Pendel: Kreisel und Tragwerk	87
Bild 4.8: Federplatte für die Controller	90
Bild 4.9: sphärisches Pendel.....	90
Bild 4.10: Laufkatze	91
Bild 4.11: äquatoriale Führung.....	92
Bild 4.12: Bauschema des Hauptbewegungsantriebs	93
Bild 4.13: Schema des Zugsystems des Sprungmechanismus	94
Bild 4.14: Sprungmechanismus, Hauptbewegungsantrieb und Haupttragwerk	96
Bild 4.15: Montageschema der Hüllkugelkante und des Seitendeckels	97
Bild 4.16: Winkelspiel der Seitendeckel	98
Bild 4.17: Gleichlaufgelenk eines Autos	98
Bild 4.18: Schema des homokinetischen Gelenks (Verbindungsgelenk), das den Hauptbewegungsantrieb und die Seitendeckel der Hüllkugel verbindet.....	99
Bild 4.19: Kugelroboter.....	100
Bild 6.1: Teile des Roboters	102
Bild 6.2: Zugmechanismus	102
Bild 6.3: äquatoriale Führung und sphärisches Pendel.....	102
Bild 6.4: Haupttragwerk, äquatoriale Führung und Pendel in der Montage.....	102
Bild 6.5: Hüllkugel mit den Seitendeckeln.....	103
Bild 6.6: Kugelroboter mit Fußpumpe	103
Bild 7.1: Veränderung der Translationsgeschwindigkeit des Roboters	105
Bild 7.2: Veränderung der Geschwindigkeit des Roboters beim Anlauf und bei der Bremsung.....	106
Bild 7.3: Veränderung des Drehwinkels des Kreiselrahmens	106
Bild 7.4: Veränderung des Neigungswinkels des Pendels und entstehende Schwingungen..	107
Bild 7.5: Sprung des Roboters.....	108
Bild 7.6: Krummlinige Bewegung des Roboters.....	109

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1: <i>Massen und Trägheitsmomente der Roboterstrukturelemente</i>	65
Tabelle 3.2: <i>Baugruppen und Antriebe</i>	78

FORMELVERZEICHNIS

T	—	kinetische Energie, [J]
U	—	potenzielle Energie, [J]
Ω	—	Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrotors, [1/s]
ω	—	Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrahmens, [1/s]
I	—	Trägheitsmoment des Kreiselrotors, [kgm ²]
M_g	—	Kreiselmoment, [Nm]
H	—	Drehimpuls des Kreiselrotors, $\left[\frac{\text{kgm}^2}{\text{c}} \right]$
F	—	Kraft, [N]
m	—	Masse, [Kg]
P	—	Gewicht, [N]
V	—	Geschwindigkeit, [m/s]
a	—	Beschleunigung, [m/s ²]
g	—	Schwerebeschleunigung, [m/s ²]
c	—	Federsteifigkeit, [N/m]
x	—	Federverformung, [m]
h	—	Sprunghöhe des Roboters, [m]
q_1, \dots, q_6	—	generalisierte Koordinaten
$\dot{\pi}_1, \dots, \dot{\pi}_6$	—	Quasikoordinaten
Q_1, \dots, Q_6	—	generalisierten Kräfte, [N]
Π_1, \dots, Π_4	—	quasigeneralisierte Kräfte, [N]
Q	—	Die Traglast des Trapezgewindetriebes, [N]
d	—	Flankendurchmesser des Trapezgewindes der Schraube, [m]
β	—	Steigungswinkel der Trapezgewinde, [Grad]
ρ	—	Reibungswinkel der Trapezgewinde, [Grad]

BEGRIFFE UND DEFINITIONEN

Mobiler sphärischer Roboter (auch der Kugelroboter) Das ist ein Roboter, der mit einem kugelartigen Gehäuse ausgerüstet ist und sich mit Hilfe dieses Gehäuses bewegen (rollen) kann.

Holonomer mobiler Roboter In der Robotik werden Roboter als *holonom* bezeichnet, wenn sie eine Bewegung in einer beliebigen Richtung unabhängig von der Lage der Mechanismen und der Geschwindigkeit des Roboters (auch beim Stillstand) ausführen können [5, 14]. Damit ist der Großteil der Rad- und der Raupenroboter *nicht holonom* im Vergleich zu den Kugelrobotern.

Sphärisches Pendel (räumliches Pendel/Kugelpendel) Ein sphärisches Pendel ist ein Pendel, dessen Aufhängung Ausschläge in unterschiedliche Richtungen zulässt. So kann die Pendelmasse des sphärischen Pendels sich auf einer Kugelfläche bewegen. Die Aufhängung dieses Pendels soll mindestens zwei Achsen besitzen. Das Kugelpendel wird als Bauelement für sphärische Roboter oft verwendet.

Hauptbewegung des Roboters Das ist eine geradlinige Bewegung des Roboters auf einer planaren Oberfläche.

Kraftmoment der Hauptbewegung Das ist ein Kraftmoment, das die Ausführung der *Hauptbewegung des Roboters* gewährleistet.

Hauptbewegungsantrieb Das ist ein Mechanismus, der einen Antriebsmotor bzw. ein Getriebe besitzt und ein Kraftmoment für die Hauptbewegung des Roboters entwickelt.

Änderung der Bewegungsrichtung des Roboters Das ist die Änderung der Richtung der Roboterbewegungstrajektorie.

Kraftmoment der Änderung der Bewegungsrichtung Das ist ein Kraftmoment, das die Ausführung der *Änderung der Bewegungsrichtung des Roboters* gewährleistet.

Antrieb der Änderung der Bewegungsrichtung des Roboters Das ist ein Mechanismus, der einen Antriebsmotor bzw. ein Getriebe besitzt und ein Kraftmoment für die Änderung der Richtung der Roboterbewegungstrajektorie entwickelt.

Haupttragwerk Das ist ein Bauelement, das alle inneren Mechanismen und Elemente des Roboters fest verbindet.

Sprungmechanismus Das ist ein Mechanismus, der die Ausführung des Sprungs des Roboters gewährleistet. Dieser Mechanismus besitzt eine Feder, einen *Zugmechanismus* und eine Feststelleinheit.

Zugmechanismus Das ist ein Mechanismus, der die Verformung der Feder des Sprungmechanismus ausführt.

Kreiselsystem Das ist ein Gerät, das aus Kreiselrotoren, Kreiselrahmen und Kreiselrotorantrieben besteht. Das Kreiselssystem kann durch das Drehen des Kreiselrotors ein *Hilfsmoment* entwickeln.

Kreiselrahmenantrieb Das ist ein Antrieb, der die Kreiselrahmen des Kreiselsystems dreht, um ein *Hilfsmoment* zu entwickeln.

Hilfsmoment Das ist ein Kraftmoment, das durch die Umdrehung des Kreiselrotors/der Kreiselrahmen entsteht. Dieses Kraftmoment kann für die Verbesserung dynamischer Eigenschaften der Bewegung des Roboters (z.B., Beschleunigung) verwendet werden.

Kippwinkel Der Kugelroboter kann für die Bewegung (mit Hilfe der Schwerpunktverschiebung) mit einem sphärischen Pendel ausgerüstet sein. Um die Roboterbewegungsrichtung zu ändern, kann dieses Pendel um die Achse drehen, die zur Bewegungsrichtung parallel liegt. Der entstehende Winkel zwischen dem Pendel und der Senkrechten zu einer Bewegungsfläche wird als „Kippwinkel“ bezeichnet.

EINFÜHRUNG

Mobile Roboter werden je nach Bewegungsraum unterschieden in fliegende Roboter (Drohnen) schwimmende Roboter und Roboter, die sich auf der Erde bewegen. Zudem existieren aber auch Roboter, die zu einem universalen Einsatz in verschiedenen Umgebungen (Luft -Wasser -Erde) verwendet werden können (z.B. Amphibienroboter).

Den häufigsten Einsatz finden mobile Roboter im komplexen Terrain. Das Potential dieser Roboter ist sehr hoch. Sie können beispielsweise zum Transport unterschiedlichster Objekte, für die Ausführung von Inspektionsoperationen an für den Menschen schwer zugänglichen Stellen sowie in Territorien mit Umgebungen, in denen die Arbeit gesundheitsgefährdend werden kann, eingesetzt werden.

Roboter, die sich nur auf der Erde bewegen, sind nach der Art des Antriebsmechanismus unterteilt in Rad-, Raupen- und Laufroboter (Roboter mit Beinen). Jede dieser Bauarten hat Vor- und Nachteile. Der Radroboter ist für die Bewegung auf planaren Oberflächen sehr gut geeignet, er hat jedoch Probleme, wenn sich auf diesen Oberflächen Hindernisse befinden. Durch die geringe Kontaktfläche zwischen den Rädern und dem Boden ist der spezifische Bodendruck hoch. Deswegen ist die Gefahr groß, dass die Bewegung des Roboters beeinträchtigt wird, wenn er bspw. auf einer nassen Oberfläche fährt (es entsteht eine Gleitreibung zwischen Rädern und Boden). Häufig werden diese Roboter deshalb mit zusätzlichen Rädern ausgestattet (z.B. sechs Räder anstatt vier), oder es werden Räder mit einem größeren Durchmesser bzw. mit einem besseren Profil verwendet (Offroad-Räder). Je anspruchsvoller das Gelände für diesen Roboter ist, desto aufwendiger ist die Konstruktion. Dadurch entsteht ein hoher Kosten- und Zeitaufwand für die Roboterentwicklung.

Raupenroboter haben eine größere Kontaktfläche als Radroboter. Dadurch ist der spezifische Bodendruck geringer. Jedoch entsteht ein Schlupf zwischen den Roboterketten und der Oberfläche bei der Änderung der Bewegungsrichtung solcher Roboter, und dieser Schlupf geht mit einem zusätzlichen Energieverlust und einem Raupenverschleiß einher.

Eine schlupffreie Bewegung können Laufroboter gewährleisten. Die wichtigsten Vorteile dieser Roboter sind die hohe Anpassungsfähigkeit des Antriebsmechanismus (der mechanischen Beine) zur Bewegungsoberfläche und eine hohe Geländefähigkeit [70-72]. Die Hauptnachteile solcher Roboter sind die Komplexität der Konstruktion und in der Folge die ungenügende Zuverlässigkeit sowie auch die niedrige Geschwindigkeit der Bewegung [88]. Die Steuerungssysteme der Laufroboter sind daher auch komplex [67-69]. Ihre Entwicklung benötigt deswegen sehr viel Zeit.

Die Nachteile des Laufroboters gelten auch für den „laufunterstützten“ Sprungroboter, der auch Beine hat. Aber die Sprungfähigkeit dieses Roboters erhöht seine allgemeine Geländefähigkeit. Das ist beispielsweise wichtig für das Dokumentieren von größeren Umweltschäden, z.B. nach Erdbeben. Dabei besteht die Möglichkeit, dass sich der Roboter nur mit Hilfe von Sprüngen fortbewegen kann.

Eine intensive Entwicklung sphärischer mobiler Roboter (Kugelroboter) hat in den letzten 20 Jahren stattgefunden. Von anderen Typen mobiler Roboter unterscheiden sich die Kugelroboter durch folgende Eigenschaften: niedriger Energieverbrauch, geringer Druck auf die Bewegungsoberfläche, hohe Mobilität, gute Steuerungsfähigkeit (einfache Steuerungssysteme) und die äußere stromlinienähnliche Form. Robotergehäuse mit einer festen elastischen sphärischen Hüllkugel verfügen über eine optimale Haltbarkeit und eine Resistenz gegen mögliche äußere Krafteinwirkungen.

Das Grundprinzip der Bewegung von Kugelrobotern beruht auf der Verschiebung des Massenmittelpunkts des gesamten mechanischen Systems. Eine Überwindung von möglichen hohen Hindernissen stellt ein Problem dar. Durch reale Konstruktionsbeschränkungen

bezüglich der Dimensionierungs- und Massenträgheitscharakteristika der Elemente der Kugelroboter kann die maximale Höhe des zu überwindenden Hindernisses bei der Rollbewegung nur bis zu ca. 25% vom Radius der Hüllkugel betragen. Aus diesem Grund sind Untersuchungen und Weiterentwicklungen nötig, um die Höhe des zu überwindenden Hindernisses zu vergrößern. In erster Linie kommen dafür Sprungverfahren in Frage, wozu der Roboter mit einem Sprungmechanismus ausgerüstet werden soll.

Um die Bewegungseigenschaften des Roboters (Beschleunigung und Geschwindigkeit) zu verbessern, können Kreiselssysteme verwendet werden. Zurzeit werden nur wenige Roboter mit Kreiselssystemen ausgestattet. Das in der vorliegenden Arbeit verwendete mechanische Grundprinzip der Kombination von Kreiselssystemen, mechanischer Schwerpunktverschiebung und Sprungmechanismus stellt einen neuartigen Ansatz für die Konstruktion sphärischer Roboter dar.

In der vorliegenden Arbeit werden Verfahren zur dynamischen Analyse und die Konstruktion eines mit Sprungmechanismus und Kreiselssystemen ausgerüsteten sphärischen Roboters entwickelt. Das Kreiselgerät, der Sprungmechanismus und andere Elemente des Roboters sind innerhalb des Robotergehäuses nach dem Prinzip des sphärischen Pendels konstruiert. Dieser Roboter besitzt vielfältige und flexible Eigenschaften bei der Bewegung über komplexes Terrain, um bspw. Navigations- und Inspektionsaufgaben zu erfüllen.

1. STAND DER TECHNIK, ZWECK UND NOVITÄT DER ARBEIT

1.1. Hauptvorteile und Einsatzbereiche der Kugelroboter

Im Vergleich zu Rad-, Raupen und Laufrobotern haben Kugelroboter folgende Hauptvorteile:

1. Infolge von geringen Rollreibungsverlusten der Hüllkugel mit der Bewegungsoberfläche ist der Energieverbrauch niedrig.
2. Die äußere stromlinienartige Form des Kugelgehäuses solcher Roboter hat keine vorstehenden Elemente (z.B. Spitzen oder Rauheit), die an umgebende Gegenstände bzw. Hindernisse stoßen oder eine Gefahr für den Menschen darstellen können.
3. Der Antriebsmechanismus, die Sensorausrüstung, die Steuerungselektronik und andere Komponenten des Roboters können innerseitig der geschlossenen Hüllkugel positioniert werden. Aus diesem Grund werden die Roboterelemente gegen mögliche mechanische sowie vor dem Einfluss äußerer Einwirkungen geschützt.
4. Das sphärische Gehäuse schafft einen geringeren Druck auf der Kontaktoberfläche als das Rad, die Raupe oder das Bein. Deshalb können die Kugelroboter auf einem weichen Untergrund (u.a. Gras, Sand, Schnee) leicht rollen, und einige Roboter können sich sogar auf dem Wasser fortbewegen.
5. Die ideale geometrische Symmetrie des Kugelgehäuses ermöglicht dem sphärischen Roboter eine hohe Manövrierfähigkeit. Er kann sich potentiell in einer beliebigen Richtung bewegen und die Bewegungsrichtung auch beim Antreffen von unüberwindbaren Hindernissen schnell ändern.
6. Wenn das sphärische Gehäuse elastisch ist, kann der Roboter die optimale Haltbarkeit und Festigkeit bei möglichen Stoßbelastungen und äußerem Druck erreichen.

Hauptgebiet für den Einsatz der sphärischen Roboter sind die Inspektion und das periodische Monitoring der sogenannten potentiell gefährlichen Objekte (PGO) [89]. Das sind Territorien und Gebäude, die bei ungünstigen Bedingungen (Umwelt- und technischen Katastrophen) negative Auswirkungen auf die ökologische Sicherheit der Umwelt haben können.

Die Standorte des Großteils der PGO (Atom-, Wärmekraft- und Kraftwerke, Fabriken, die gefährlichen Chemikalien und Stoffe produzieren bzw. diese einlagern, Dämme, einige Kommunikationszentren [89] usw.) sind meist abgelegen. Die Aufgaben der Inspektion für die PGO werden normalerweise sowohl mit nichtmobilen Videokameras, Sensoren usw. als auch mit Hilfe der Mitarbeiter ausgeführt. Deswegen bietet sich in solchen Gebieten die Anwendung des Roboters an. Roboter sind mobil einsetzbar und können intensiv verwendet werden. Zudem besteht die Chance, einen hohen Informationsgewinn zu erzielen, eine gute Anpassungsfähigkeit an die Umwelt zu erreichen und die Möglichkeit an gesundheitsschädlichen Orten (zum Beispiel in Objekten der atomaren und chemischen Industrie) eingesetzt zu werden.

Deswegen sollen entsprechende Roboter mobil und steuerbar sein, um die Bewegung auf komplexem Terrain mit den verschiedensten Hindernissen zu erreichen. Es wäre dabei wünschenswert, dass der Roboter nicht nur die Möglichkeit der Ausführung der Kontrolle- und Inspektion haben soll, sondern auch die übliche Belastung aushalten kann.

Bei der Entwicklung und Konstruktion des Roboters für die Inspektion der PGOs muss Folgendes beachtet werden:

1. Die PGO sind oft weit von Wohnorten (wie Städten bzw. Dörfern) entfernt.
2. Die PGO sind meist großflächig (normalerweise vom 60 bis 30 000 Hektar).
3. Das Terrain der PGO ist oft komplex. Beispielsweise sind einige Flächen des Terrains

asphaltiert, andere PGO haben Straßen/Wege für Fahrzeuge, die durch die Verdichtung des Bodens gebildet worden sind.

4. Die Witterungsbedingungen bei PGO können sehr wechselhaft sein. Die vollständige Funktionsweise des Roboters muss daher bei u.a. Schnee, Regen, Frost und Verschmutzung, bei hohen Temperaturen und bei starken Winden gewährleistet sein.

5. Die Komplexität des Geländes der PGO kann sehr anspruchsvoll sein (geneigte, steinige und gestufte Fahr- und Bewegungsstrecken). In diesem Fall soll die Roboterkonstruktion notwendige Parameter der Roboterbewegungsfläche wie die maximal zu überwindende Neigungsfläche und die Höhe der möglichen Hindernisse sicherstellen.

Die angeführten Einsatzmerkmale des Kugelroboters für die Inspektion sollten bei der Entwicklung und Projektierung seines Antriebsmechanismus berücksichtigt werden. Dieser soll die hohe Manövrierfähigkeit des Roboters an beliebigen potentiellen Einsatzorten gewährleisten (von urbanisierten Stadtstraßen bis zur wilden Natur). Der Antriebsmechanismus muss auch die Änderung der Bewegungsrichtung mit dem minimalen Radius der Wendung sicherstellen (bei Richtungsänderungen in den engen Durchgängen) und das für die Überwindung der Hindernisse notwendige Rollmoment entwickeln. Ein wichtiger Faktor ist auch die Autonomie des Roboters, der in der geforderten Zeit die notwendigen Aufgaben ohne neue Aufladung der Akkus ausführen soll. Die Vorteile der Akkus gegenüber der Kabelstromversorgung der Roboter bei kompliziertem Gelände sind offensichtlich.

Für die Inspektion der PGO können Flugroboter (Drohnen) verwendet werden. Diese können in verschiedenen Höhen eingesetzt werden, aber ihre Manövrierfähigkeit und die Autonomie sind für die allseitige Kontrolle bzw. die Inspektion ungenügend. Darüber hinaus funktionieren diese Roboter bei schwierigen Witterungsbedingungen (Regen, Nebel, Windböen u.a.) schlecht und unsicher, und sie brauchen Rollbahnplatz und einen Mitarbeiter/Operator für ihre Bedienung. Aus diesen Gründen ist der Betrieb solcher Roboter sehr aufwendig.

Aus den beschriebenen Eigenschaften und Merkmalen des Kugelroboters folgt, dass dieser Roboter für die komplizierten Anforderungen der Inspektion von PGO und die ökologische Kontrolle der Umwelt optimal geeignet ist. Zudem können die Kugelroboter in anderen Anwendungsbereichen, zum Beispiel bei Unterwassereperimenten, als Spielzeug und als Lehrmittel für Kinder verwendet werden.

1.2. Zusätzliche Bauarten der Antriebsmechanismen der Kugelroboter

Die ersten Kugelfahrzeuge sind vor einhundert Jahren entwickelt worden, aber die mobilen sphärischen Roboter sind erst in den letzten beiden Jahrzehnten intensiv weiterentwickelt worden. Die Bauarten, die Steuerungssysteme und die Typen der Antriebsmechanismen der Kugelroboter sind ausführlich in diesem Kapitel beschrieben.

Zurzeit befinden sich die wissenschaftlichen und technischen Möglichkeiten für sphärische Roboter im Wesentlichen auf der Stufe der Realisierung der Konzeptionierung und der Prinzipien ihrer Bewegung. Die Methoden der Optimierung der Bewegungsparameter der Kugelroboter sind weniger intensiv erforscht.

Die Mehrheit der zurzeit konstruierten sphärischen Roboter ist *holonom*. In der Robotik werden Roboter als *holonom* bezeichnet, wenn sie die Bewegung in einer beliebigen Richtung unabhängig von der Lage der Mechanismen und der Geschwindigkeit des Roboters (auch beim Stillstand) ausführen können [5,14,61]. Der Großteil der Rad- und der Raupenroboter sind *nicht holonom*.

Es gibt kein einheitliches vorherrschendes Verfahren, um die Roboter *holonom* zu konstruieren. Dieser Prozess ist sehr kompliziert und beinhaltet komplexe Aufgaben. In dieser

Dissertation über die Roboterentwicklung wird eine Kombination der Grundkonzeptionen und der entsprechenden Bewegungsprinzipien der Kugelroboter realisiert.

Bei der Konstruktion der sphärischen Roboter sind es immer die Bewegungsmechanismen, die das Roboterrollen durch die Drehung der Hüllkugel gewährleisten. Diese soll in einem bestimmten Verfahren mit dem Bewegungsmechanismus verbunden sein, und aus diesem Grund können bestimmte Entwicklungsprobleme beim Projektierungsprozess häufig auftreten. Zahlreiche Bauarten der Bewegungsmechanismen sind entwickelt worden, um eine möglichst hohe *Holonomität* und gute Bedienbarkeit der Roboter zu erreichen. Jede Bauart hat jeweils Vor- und Nachteile. Manche Konstruktionen haben aus Gründen zahlreicher Entwicklungskompromisse Besonderheiten: die Masse des Roboters wird für die Akkus verringert, die Geschwindigkeit der Roboterbewegung verringert sich zugunsten einer besseren Bedienbarkeit.

Zurzeit werden drei prinzipielle Bewegungsverfahren der Kugelroboter verwendet. Diese sind im nächsten Teil der Dissertation beschrieben.

1.2.1. *Bewegungsverfahren mit Hilfe der Verschiebung des Massenmittelpunkts*

Dieses Bewegungsverfahren ist am populärsten und wird am häufigsten verwendet, aber die technische Realisierung ist auch ziemlich komplex. Das Bewegungsverfahren ist auf der Verschiebung des allgemeinen Massenmittelpunkts des Roboters relativ zu seiner Kontaktzone mit der Bewegungsoberfläche begründet. Diese Verschiebung des Massenmittelpunkts zwingt den Roboter, sich in einer bestimmten Richtung umzudrehen, damit er rollen (Bild 1.1) kann. Der Hauptnachteil der Verschiebung des Massenmittelpunkts ist folgender: die Größe des Rollmoments ist durch die Positionierung des Zentrums der Massen des Roboters begrenzt, weil durch diese Positionierung nicht mehr der Radius der Roboterhüllkugel erreicht werden kann.

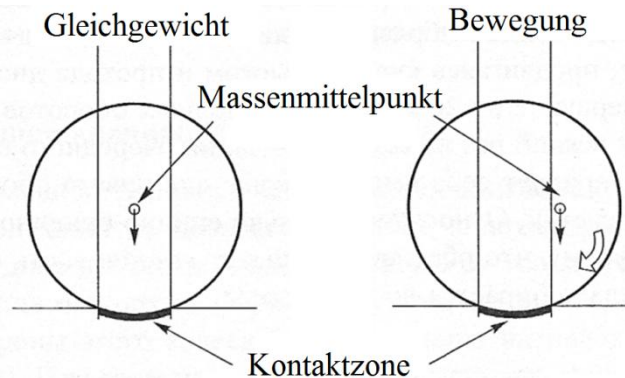


Bild 1.1: Bewegungsverfahren des Kugelroboters mit Hilfe der Verschiebung des Massenmittelpunkts [4]

Im Rahmen dieses Bewegungsverfahrens werden folgende Bauschemata verwendet:

1. Das Laufkatze-Bauschema

Dieses Bauschema wird oft als das „Hamsterrad“ (vom Eng. „Hamster ball“, [2]) bezeichnet. Es ist wie folgt aufgebaut:

Innerseitig des Roboters befindet sich die mobile Laufkatze, die mit Rädern ausgestattet ist. Diese Laufkatze verfügt über Antriebe, um die Räder zu drehen, und kann sich deswegen auf der inneren Seite der Hüllkugel bewegen. Bei der Bewegung der Laufkatze entsteht eine Verschiebung des Massenmittelpunkts, und der Roboter rollt. Dieses Prinzip wird auch für das Hamsterrad verwendet, deshalb wird das beschriebene Bewegungsverfahren in der englischen Quelle als „Hamster ball“ bezeichnet.

Das Laufkatze-Bauschema ist in Bild 1.2 dargestellt.

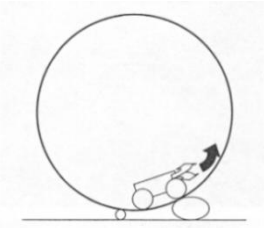


Bild 1.2: Laufkatze-Bauschema des Kugelroboters, der sich mit Hilfe der Massenmittelpunktverschiebung bewegt [4]

Der Massenmittelpunkt der Laufkatze kann sehr weit vom Zentrum der Hüllkugel entfernt sein. Dadurch wird die Funktionsweise dieses Bewegungsmechanismus nicht eingeschränkt. Deswegen erreicht das auf den Roboter wirkende Rollmoment einen hohen Wert, und der Kugelroboter kann damit ein relativ hohes Hindernis überwinden.

Die nach diesem Bewegungsschema entwickelten Roboter sind einfach (beinhalten nichtkomplexe Elemente). Sie können leicht und robust sein. Der Roboter „Sphericle“ [5], der an den Universitäten von Pisa und Siena (Italien) konstruiert worden ist, ist ein gutes Beispiel für einen Roboter mit diesem Bewegungsprinzip. Dieser Roboter kann auf einer planaren Oberfläche fahren. Die Bewegung der Laufkatze lässt den Roboter geradlinig rollen, und er kann die Bewegungsrichtung beliebig ändern. Um die Bewegungsrichtung zu ändern, sollte die Laufkatze ihre Stellung innerseitig des Gehäuses schwenken, aber das ist momentan nicht realisierbar.

Durch die Verwendung einer Mehrradlaufkatze oder der sogenannten Mecanum-Räder/Allseitenräder kann der Kugelroboter durch beliebige Bewegungstrajektorie rollen. Die Steuerung solcher Laufkatzen kann nicht kompliziert sein [9, 12].

Das Laufkatze-Bauschema hat folgenden Hauptnachteil:

Es entsteht immer ein Schlupf zwischen den Rädern der Laufkatze und der inneren Fläche der Hüllkugel. Je größer der Schlupf ist, desto ungenauer ist die Bewegungstrajektorie des Roboters. Dieser Schlupf kann mit Hilfe des Sonderdateigebers des Steuerungssystems gemessen bzw. gesteuert werden, um diesen möglichst niedrig zu halten und/oder die Laufkatzenbewegung zu korrigieren. So kann die präzise Bewegung des Roboters durch die gewünschte Trajektorie erreicht werden [6]. Das zieht jedoch einige Nachteile nach sich, denn der Roboter wird wesentlich teurer, komplizierter und schwerer.

Die nach diesem Laufkatze-Schema entwickelten Roboter sind jedoch sehr störanfällig bei dynamischen Belastungen, z.B. bei auf die Hüllkugel wirkenden Stößen. Unter diesen Belastungen kann die Laufkatze kurzzeitig den Kontakt mit der Hüllkugel verlieren und ihre Richtung unberechenbar ändern. Bei der Überwindung eines Hindernisses (z.B. einer Stufe) kann sich die Laufkatze überschlagen, und der Roboter wird steuerlos. Aus diesem Grund ist das Laufkatze-Schema nicht gut geeignet für die Auswahl eines Roboters für komplexes Terrain.

2. Das Schema mit dem federbelasteten inneren Bein

Um die Nachteile des Laufkatze-Schemas zu umgehen und den Kontakt mit der inneren Hüllkugelfläche zu verbessern, ist die in Bild 1.3. dargestellte Bauart des Kugelroboters entwickelt worden [65]. Hauptelement der Konstruktion ist ein inneres senkrechtes Bein (5), das mit einer Feder (6) ausgestattet ist. Durch diese Feder und durch das sphärische Lager (7) stemmt sich das Bein (5) gegen die Hüllkugel (1).

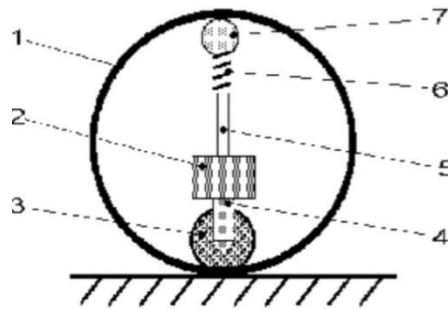


Bild 1.3: Schema des Kugelroboters mit dem federbelasteten inneren Bein [65]

1 –Hüllkugel; 2 –Elektronik (u.a. Akkus, Steuerungselemente); 3 –Antriebsrad; 4 –Lager des Rads; 5 –federbelastetes Bein; 6 –Feder; 7 –sphärisches Lager

Durch die Drehung des Rads (3) kippt das Bein (5) um die zentrale Achse der Hüllkugel, dann verschiebt sich der Gesamtmassenmittelpunkt des Systems, und der Roboter rollt. Das Lager (4) kann sich um die Achse des Beins drehen, um die Roboterbewegungsrichtung zu ändern. Dazu benötigt das Bein zwei Antriebe. Das sind:

- *der Hauptbewegungsantrieb*, der das Rad (3) für die *Hauptbewegung* des Roboters dreht
- *der Antrieb für die Änderung der Bewegungsrichtung*; Dieser dreht das Lager (4) um die Achse des Beins.

Das Bauschema hat folgende Vorteile:

Die Positionierung des Beins ist präziser als die Laufkatze des entsprechenden Bauschemas (besonders für eine relativ geringe Geschwindigkeit der Bewegung). Auch wenn Störungen oder Beschädigungen der Hüllkugel durch die wirkenden Belastungen entstehen, kann der Roboter trotzdem in Betrieb bleiben (wenn die Größe der geschlagenen Löcher in der Hüllkugel nicht größer als der Durchmesser des Rads (3) bzw. des Lagers (7) ist).

Das Bauschema des Kugelroboters mit dem federbelasteten inneren Bein ermöglicht es, dass sich alle Mechanismen leicht und kompakt konstruieren lassen. So kann Roboter sehr einfach konstruiert werden.

Der wesentliche Nachteil dieses Bewegungsprinzips ist jedoch ein Schlupf des Rads (3) bei hoher Geschwindigkeit des Roboters. Wenn die Feder (6) regelbar ist, kann sich die Reibung zwischen dem Rad und der Hüllkugel vergrößern. Genau aus diesem Grund werden die Reibungsverluste höher.

Das innere Bein des Roboters sollte „feinausgewuchtet“ werden (wie ein Rotor des Kreiselgeräts), um die stabile Trajektorie der Roboterbewegung zu erreichen. Jedoch bildet die genaue Kongruenz des Massenmittelpunkts der Hüllkugel und des Beins die wesentliche konstruktive Schwierigkeit. Damit die zentralen Elemente des Roboters (das Bein) schnell rotieren können, sollte das Bein eine möglichst große Masse haben. So wird aber das Gesamtgewicht des Roboters größer.

Das Bauschema des federbelasteten inneren Beins ist für den ersten Prototyp des in der Universität Helsinki entwickelten Roboters „Rollo“ [7] und für den Prototyp des Roboters „SMR“ (Polytechnische Universität Bari, Italien) [8] verwendet worden. „SMR“ hat eine Zylinderform mit dem Durchmesser 0,16 m gehabt und ist mit den DC-Motoren ausgerüstet gewesen, um eine Geschwindigkeit bis zu 0,6 m/s zu erreichen.

Aus den Vor- und Nachteilen des beschriebenen Bauschemas kann folgendes Fazit gezogen werden. Die Bauart des Kugelroboters mit dem inneren federbelasteten Bein ist interessant in erster Linie für Laborforschungen und eignet sich für den praktischen Einsatz auf komplexem Terrain nicht besonders gut.

Die Bauschemata mit der Laufkatze und mit dem inneren Bein werden im Roboter „BHQ-3“ verbunden [9]. Das zentrale Element dieses Roboters ist ein Antriebsrad, das mit einem DC-Motor ausgerüstet ist. Mit Hilfe des Antriebrads kann der Roboter die Hauptbewegung ausführen. Dann ist die Masse der innerseitigen Elemente des Roboters nicht mehr die einzige Bestimmungsgröße der maximalen Geschwindigkeit. Die Mehrradlaufkatze ist als äquatoriale Plattform konstruiert, die mit drei Rädern ausgestattet ist. Die Plattformebene ist senkrecht zur der Antriebsradenebene angeordnet, und das Antriebsrad befindet sich auch auf dieser Plattform (auf ihrer Unterseite).

Die Räder der Laufkatze sind mit einem Einzelantrieb ausgerüstet und haben immer einen spielfreien Kontakt mit der inneren Seite der Hüllkugel. Diese Räder können die Laufkatze-Plattform mit dem Antriebsrad um die senkrechte Achse drehen, um die Bewegungsrichtung des Roboters zu ändern. Der Roboter kann auf kohäsionslosem Boden rollen, kleine Steigungen und sogar Wasserhindernisse überwinden. Jedoch ist eine kontrollierte Bewegung auf einer negativen Steigungsebene für den Roboter „BHQ-3“ schwer auszuführen.

3. Das Schema der Mehrmassenverschiebung

Wenn ein Roboter die Verschiebung einiger innerseitigen Massen verwendet, um die Position des Gesamtmassenmittelpunkts zu verändern, dann wird die Roboterbauart, um dieses Bewegungsprinzip zu gewährleisten, als *das Schema der Mehrmassenverschiebung* bezeichnet (Bild 1.4). Die Massen bewegen sich hierbei durch Linearführungen.

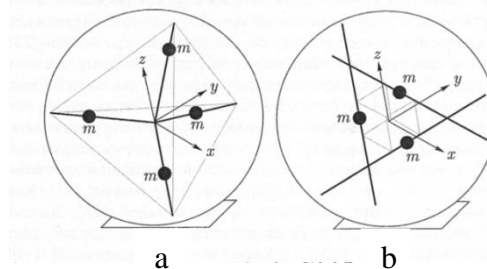


Bild 1.4: Schema der Mehrmassenverschiebung [4]

Ein wichtiger Vorteil dieses Bauschemas ist folgender:

Der Roboter ist *holonom*, daher kann er sich zu jedem Zeitpunkt in eine beliebige Richtung bewegen. Zudem kann er an einem beliebigen Ort zum Stillstand kommen, weil der Gesamtmassenmittelpunkt des Roboters in eine beliebigen Position innerseitig der Hüllkugel verschoben werden kann.

Der Hauptnachteil dieses Bauschemas liegt im Bereich der Steuerungsschwierigkeit. Beispielsweise sollen sich alle Massen für die geradlinige Bewegung des Roboters gleichzeitig bewegen, und ihre Linearantriebe müssen gleichzeitig gesteuert werden. Aus diesem Grund wird die Rollgeschwindigkeit des Roboters relativ gering. Zudem wird die Gesamtmasse des Roboters durch einige Ballastmassen größer.

Ein gutes Beispiel für das Schema *der Mehrmassenverschiebung* ist der Roboter „Spherobot“, der an der Universität Michigan (USA) konstruiert worden ist [10]. Dieser hat vier radiale Stricknadeln-Linearführungen, die einen Tetraeder bilden. Die Winkel zwischen diesen Linearführungen sind gleich (Bild 1.4 a). Entlang jeder Führung kann eine einzige Masse von einem Ende der Führung (im Massenmittelpunkt der Hüllkugel) bis zum Kugelgehäuse des Roboters verschoben werden. Der Prototyp dieses Roboters ist bis jetzt nicht vorgestellt worden, obwohl es Publikationen nach der Planung seiner Bewegung gibt.

Wegen der Konstruktionsprobleme und der Vorteile der geringen Unwucht jeder Masse ist eine neue Version des „Spherobot“-Roboters entwickelt worden. Dieser verwendet drei Ballastmassen (Bild 1.4 a) [11]. Diese Massen bewegen sich entlang der entsprechenden Linearführungen, die durch drei gegenseitige senkrechte Ränder des virtuellen Kubus

begrenzt sind (Bild 1.4, b). Dieser Kubus befindet sich in der Mitte der Hüllkugel. Die Vergrößerung der maximalen Linearführungslänge um das 1,15-fache (relativ zum ersten Roboterprototyp, der in Bild 1.4 a dargestellt ist) ermöglicht es, das Rollmoment des Roboters zu vergrößern. Die Verwendung von drei statt vier Massen bewirkt auch eine Verringerung der Gesamtmasse des Roboters.

Der Durchmesser der Hüllkugel des Roboters „Sphero“ beträgt 0,813 m. Die Linearführungen sind mit DC-Motoren ausgerüstet, wobei die Gesamtmasse jeder Linearführung (Motor, Führung und zu verschiebende Masse) jeweils 14,2 kg ist. Deshalb ist die Gesamtmasse des Roboters relativ hoch. Die Durchschnittsgeschwindigkeit von „Sphero“ liegt bei 0,65 m/s.

Ein weiterer Roboter, der auf der Grundlage des Schemas *der Mehrmassenverschiebung* entwickelt worden ist (an den Universitäten der Städte Qazvīn und Teheran, Iran), wird „August“ genannt [12]. Der Massenmittelpunkt des Roboterantriebs stimmt bei diesem Beispiel mit dem Mittelpunkt der Hüllkugel überein. Der Antrieb von „August“ besteht aus vier symmetrisch angeordneten Linearführungen mit verschiebbaren Massen. Der Roboter ist mit einer Funksteuerung ausgerüstet und kann sich geradlinig bzw. durch eine wahlfreie Trajektorie bewegen. Der äußere Durchmesser der Roboterhüllkugel beträgt 0,29 m, die Gesamtmasse ist 12,1 kg, und er erreicht eine maximale Geschwindigkeit von 1,0 m/s.

4. Das Schema mit den halbsphärischen Rädern

Der diesem Bauschema entsprechende Kugelroboter besitzt zwei halbsphärische Räder, die mit dem zentralen Pendel durch die drehbaren separaten Achsen verbunden sind (Bild 1.5). Die Räder sind mit separaten Antrieben ausgerüstet, um die Achse des Pendels separat drehen zu können. Wenn die Drehgeschwindigkeiten und die Drehrichtungen beider Räder gleich sind, führt der Roboter eine geradlinige Hauptbewegung aus. Wenn die Drehgeschwindigkeiten und/oder Drehrichtungen ungleich sind, ändert der Roboter die Bewegungsrichtung oder dreht sich auf einer Stelle. Die zuletzt genannte Möglichkeit ist ein Hauptvorteil des nach diesem Bauschema konstruierten Roboters.

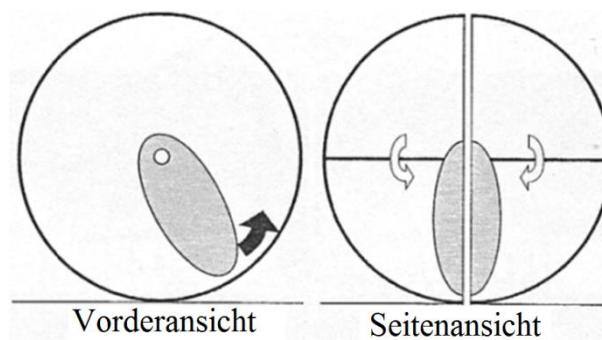


Bild 1.5: Schema des Roboters mit den halbsphärischen Rädern [4]

(der schwarze Pfeil verdeutlicht die Drehrichtung des Pendels, die weißen Pfeile geben die Drehrichtungen der halbsphärischen Räder an)

Dieses Bauschema hat folgende Nachteile:

In erster Linie hat der Roboter das Problem der Dichtungen zwischen dem Pendel und den Rädern bei ungünstigen äußeren Einwirkungen (u.a. Feuchtigkeit, Staub). Die Teile der halbsphärischen Räder, die nahe an der zentralen Achse liegen, sollten nicht an der Stützoberfläche reiben. Diese Reibung kann unter Umständen zu einer Unterbrechung der Bewegung des Roboters führen.

Der Roboter „Kickbot“ ist im Institut für Technologie Massachusetts (USA) auf der Grundlage des Schemas der halbsphärischen Räder konstruiert worden. Dieser Kugelroboter besteht aus zwei Halbkugeln auf einer Achse und aus einer dicken zentralen Scheibe. Auf der

Scheibe befinden sich die Motoren, die Akkus, die Steuerungselemente und die Sensoren bzw. die Webkamera. Jedes Halbkugelrad ist mit einem Differentialantrieb ausgestattet. Der Hüllkugeldurchmesser beträgt 0,28 m und die Scheibendicke ist 0,03 m. Der Roboter kann sich in einer beliebigen Richtung bewegen, wobei die theoretisch maximale Geschwindigkeit bei 3 m/s liegt.

5. Das Bauschema mit Ballastmassen auf einer starren Achse

Das Prinzip verwendet die Schwingungsbewegungen und die linearen Verschiebungen der Ballastmassen. Diese Massen hängen wie das Pendel auf einer zentralen Achse, die mit der Hüllkugel des Roboters (Bild. 1.7) fest verbunden ist. Durch die gleichzeitige Drehung oder Verschiebung solcher Massen entsteht Folgendes:

Mit Hilfe der Schwingungsbewegungen führt der Roboter die Hauptbewegung nach der geradlinigen Trajektorie aus. Durch die Linearbewegung der Massen entsteht die Neigung der Rollebene des Roboters. Eine solche Neigung ruft die Änderung der Bewegungsrichtung hervor, und in diesem Fall wird die Bewegung des Roboters im weiteren Verlauf kreisförmig.

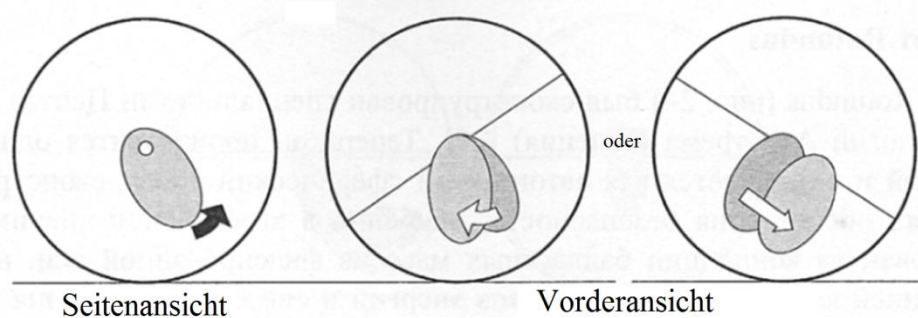


Bild 1.6: Bauschema des Kugelroboters mit Ballastmassen auf einer starren Achse [4]

(der schwarze Pfeil verdeutlicht die Drehrichtung der Masse, die weißen Pfeile geben die Richtungen der Schwingungs- oder Linearbewegungen der Massen an)

Diesem Bauschema entsprechende Konstruktionen haben jedoch Nachteile. Die beschriebenen Verschiebungen der Massen sind auf den Radius der Hüllkugel des Roboters beschränkt. Der Roboter kann sich nicht auf einer Stelle um die senkrechte Achse drehen, da die Abhängungsachse der Ballastmassen mit dem Robotergehäuse fest verbunden ist. Wenn ein hohes Rollmoment (z.B. für die Bewegung des Roboters auf einer geneigten Oberfläche) benötigt wird, können die zu verschiebenden Massen schwerer sein, aber das führt zu einer Vergrößerung der allgemeinen Masse des Roboters. Den ersten sphärischen Roboter, der auf der Grundlage des Bauschemas mit Ballastmassen auf einer starren Achse konstruiert worden ist, haben die Wissenschaftler M. Kabala und M. Wnuk [14] vorgestellt. Die Roboter von Shao Jun Ma [62] und von Dip Narayan Ray [64] verwenden ähnliches Prinzip.

Der Roboter „Roball“, der später an der Universität Sherbrooke (Kanada) entwickelt worden ist [14], ist ein autonomes Roboter-Spielzeug, das sich auf planaren Oberflächen fortbewegen kann. „Roball“ kann sich auf einer Ebene mit einem Neigungswinkel bis zu 8° fortbewegen und kleine Hindernisse mit einer Höhe bis zu 8 mm überwinden. Die Hüllkugel des Roboters hat einen äußeren Durchmesser von 0,15 m, eine Masse von 1,8 kg, und die Geschwindigkeit von 0,5 m/s kann erreicht werden.

Der Roboter „Rotundus“ ist im Weltraumtechnologiezentrum Angstrom (Uppsala, Schweden) konstruiert worden [15]. „Rotundus“ ist tatsächlich der einzige sphärische Roboter, den es zurzeit in industrieller Herstellung gibt. Dieser autonome mobile Roboter wird unter anderem für Aufgaben und Einsatz in einer aggressiven äußeren Umgebung verwendet. Seine innere Konstruktion, die Akkus und das Steuersystem sind ein Geschäftsgeheimnis des Entwicklers. Die Bewegung des Roboters ist sowohl auf festen Oberflächen als auch auf nachgebenden

Oberflächen (u.a. Schnee) getestet worden. Der Körper des Roboters hat einen äußeren Durchmesser von 0,5 m, die Masse des Roboters beträgt 1,8 kg, und er kann eine Geschwindigkeit von bis zu 6,7 m/s erreichen.

Wichtig! Das Pendel des „Rotundus“-Roboters kann auch als „sphärisches Pendel“ bezeichnet werden, weil dieses Pendel um zwei senkrechte Achsen rotieren kann.

6. Das Bauschema mit den Ballastmassen auf einer beweglichen Achse

Dieses Schema weist einen entscheidenden Unterschied zum Bauschema 5 (mit den Ballastmassen auf einer starren Achse) auf. Die Ballastmassen können entlang der zentralen Achse nicht verschoben werden, aber die Achse kann sich bewegen und in der Ebene drehen, die senkrecht zu der Rollebene des Roboters (Bild 1.7) liegt. Dann kann der Roboter sich an Ort und Stelle um die senkrechte Achse drehen und die Bewegung in einer beliebigen Richtung fortsetzen. Die Richtung der Hauptbewegung des Roboters ist immer senkrecht zur Zentralachse, und aus diesem Grund kann der Roboter nicht wenden.

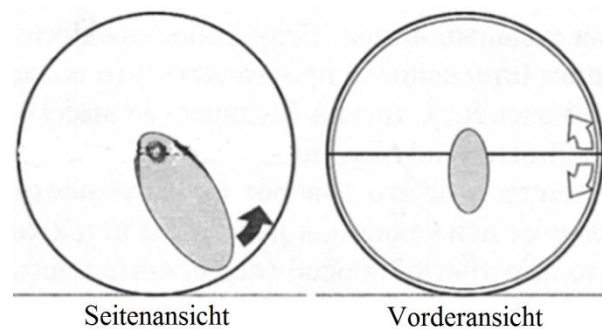


Bild 1.7: Bauschema des Roboters mit den Ballastmassen auf einer beweglichen Achse [4]

(der schwarze Pfeil verdeutlicht die Drehrichtung der Masse, die weißen Pfeile geben die Richtungen der Drehung der Zentralachse an)

Nach dem beschriebenen Prinzip ist der Roboter „Rollo“ [2] entwickelt worden. Die Ballastmassen können sich in einer beliebigen senkrechten Ebene drehen. Die Richtung der Wendung des Roboters ergibt sich aus dem Drehwinkel der zentralen beweglichen Achse relativ zu der runden Führung (des Zahnkranzes). Diese gezahnte Führung ist mit der inneren Seite der Hüllkugel fest verbunden. Wenn der Roboter rollt, bewegt sich die Führung zusammen mit dem Kugelgehäuse und ist nur zweimal durch eine Robotervollumdrehung (360°) horizontal orientiert. Gerade in diesen Lagen kann der „Rollo“-Roboter eine Wendung ausführen und die Richtung der weiteren Bewegung „wählen“. Die Anzahl der kompletten Halbumdrehungen, die der Roboter dazu ausführen soll, wird vom induktiven Sensor berechnet. „Rollo“ ist sowohl auf Gras als auch auf Sand erprobt worden. Er kann sich auf einer geneigten Ebene bewegen und kleinere Hindernisse überwinden. Die Hüllkugel hat einen äußeren Durchmesser von 0,24 m, die Masse des Roboters beträgt 3,0 kg, und eine Geschwindigkeit von bis zu 0,5 m/s kann erreicht werden.

7. Das Bauschema der Laufkatze mit den Mecanum-Rädern/Allseitenrädern

Eine der perspektivischen Bauarten der sphärischen Roboter ist das Schema mit der Laufkatze, die mit Mecanum-Rädern/Allseitenrädern ausgerüstet ist. Für das Roboterrollen kann die Laufkatze die omnidirektionale (allseitige) Bewegung innerhalb des Körpers ausführen.

Der Roboter „Omicron“ [17] ist mit einer Laufkatze, die mit Allseitenrädern bestückt ist, ausgerüstet. Diese Laufkatze hat drei Allseitenräder. Die Räder, die die Bewegung der Laufkatze gewährleisten, sind mit separaten Antrieben ausgestattet (Bild 1.8).

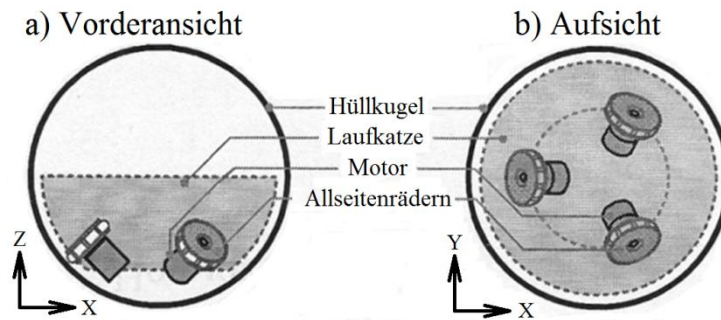


Bild 1.8: Bauschema des Kugelroboters mit der Laufkatze, die mit Allseitenrädern ausgerüstet ist [17]

Die Allseitenräder werden auch für die Radroboter verwendet, um die sofortige Änderung der Bewegungsrichtung und die Drehungen des Roboters an Ort und Stelle zu gewährleisten. Jedes Allseitenrad (auch die Bezeichnung „omnidirektionales Rad“ wird verwendet) besitzt eine große Anzahl von kleinen frei drehenden Rollen, die sich auf dem Allseitenkranz des Rads befinden. Die Achsen dieser Rollen liegen in Ebenen, die zu der Allseitenradachse senkrecht sind.

Das Allseitenrad kann beim Drehen auf der inneren Oberfläche der Hüllkugel zu verschiedenen Seiten frei gleiten, um die Richtung der Roboterbewegung zu ändern. Wenn die Laufkatze in einer Dreieckform konstruiert und jede Ecke mit einem separaten Rad ausgestattet ist, kann der Roboter theoretisch die Bewegung in eine beliebige Richtung ausführen. Das kinematische Schema der Bewegung der Elemente des „Omnicon“ ist im Bild 1.9 dargestellt.

a) Bewegung entlang der x-Achse

b) Bewegung entlang der y-Achse

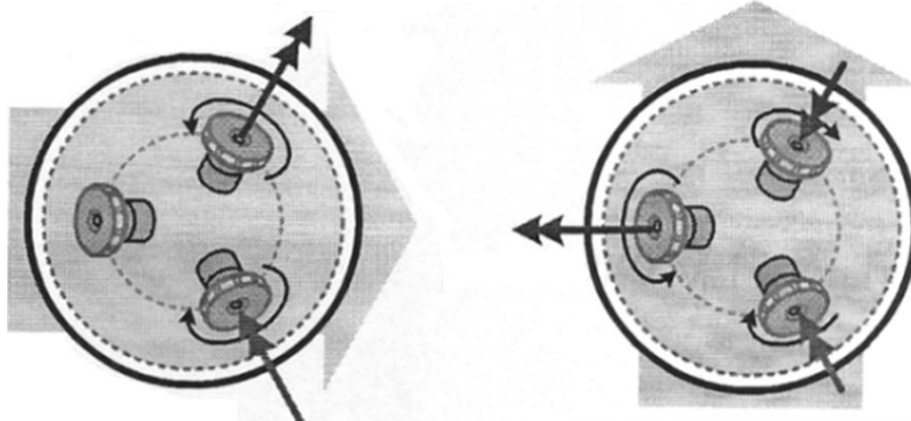


Bild 1.9: Kinematisches Schema der Bewegung der Elemente des „Omnicon“ [17]

Die Sollanzahl der Umdrehungen jedes Rads schränkt die Eigenschaften der Bewegung des Roboters (Geschwindigkeit und Richtung) ein. Für die gerade Bewegung entlang der x-Achse sollen sich zwei Räder mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit drehen (Bild 1.9 a). Wenn sich der Roboter entlang der z-Achse bewegen soll (Bild 1.9 b), müssen sich alle drei Räder mit einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit drehen.

Ein anderer sphärischer Roboter „Spherobot“ (von A. A. Kilin) [18] ist mit einer Laufkatze ausgerüstet, die drei Mecanum-Räder besitzt. Die Achsen der Rollen jedes Mecanum-Rads befinden sich in einem Winkel von 45° zur Achse dieses Mecanum-Rads. Die Projektionen der Winkel zwischen den Mecanum-Radachsen an der Ebene der Laufkatze betragen 120° . Da die Rollen des Mecanum-Rads normalerweise für die Bewegung auf planaren Oberflächen bestimmt sind, sind die Sonderformrollen für die Bewegung nach der inneren sphärischen Oberfläche der Hüllkugel entwickelt und hergestellt worden.

Die Experimente mit dem „Spherobot“ sind für die Bewegungen im Quadrat und im Kreis mit den Geschwindigkeiten von 0,1 bis 0,5 m/s ausgeführt worden. Die Fehlerquote ist in den Umstellungen nach den geraden Trajektorien sehr gering gewesen. Aber bei der Bewegung im Kreis oder durch die kreisartige Trajektorie steigt die Fehlerquote (besonders mit der Steigerung der Geschwindigkeit) und erreicht bis zu 60 %.

1.2.2. Bewegung des Kugelroboters durch die Verwendung des Drehimpulses des Kreisel

Das zweite bedeutende Verfahren der Kugelroboterbewegungen ist auf der Verwendung des kinetischen Moments des Kreiselrotors begründet. Bei der Bewegung des Kreiselrahmens mit dem drehenden Hochgeschwindigkeitsrotor entstehen Stützkräfte, die auf die Rotorlager wirken. Diese können Kraftmomente in allen drei Ebenen des globalen Koordinatensystems entwickeln.

Ein Hauptelement jedes Kreiselgeräts ist der Rotor, der sich mit hoher Winkelgeschwindigkeit dreht. Die Rotorachse kann auf diese oder andere Weise ihre Raumrichtung ändern. Für diesen Zweck ist der Rotor in einem Kreiselrahmen gelagert. Dieser hat die Möglichkeit, sich um alle verschiedenen Achsen zu drehen. Die praktischen und theoretischen Informationen über Kreiselgeräte sind in den Quellen [19, 20] detailliert beschrieben. Das kinematische Schema des einaxialen Kreiselgeräts im Bild 1.10 dargestellt.

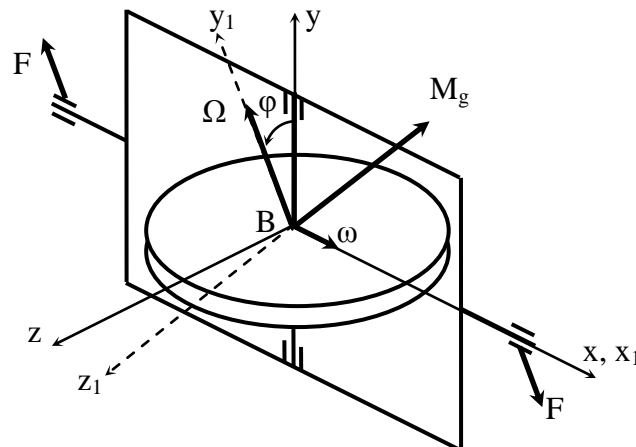


Bild 1.10: Kinematisches Schema des einaxialen Kreiselgeräts

Der Kreiselrotor des Kreiselgeräts hat ein Trägheitsmoment I und dreht sich mit einer Winkelgeschwindigkeit Ω . Durch die Drehung des Kreiselrahmens mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = \dot{\varphi}$ entsteht ein Kreiselmoment $\bar{M}_g = I \cdot (\bar{\Omega} \times \bar{\omega})$ [63]. Dieses entwickelt ein Kräftepaar F . In Abhängigkeit von der Anordnung der Ebene des Rotordrehens zum inneren Raum des Kugelroboters kann das diesem Kräftepaar entsprechende Moment die Bewegungen des Roboters, die Neigung der Ebene der Hauptbewegung oder die Drehung des Roboters an Ort und Stelle gewährleisten.

H. Benjamin Brown und Yangsheng Xu haben einen der ersten Kugelroboter mit dem Kreisel entwickelt [85]. S. Bhattacharya und S. Agrawal [21] haben einen sphärischen Roboter mit zwei konzentrischen Rotoren konstruiert. Die Rotorachsen liegen hierbei gegenseitig senkrecht und überqueren den Massenmittelpunkt der Roboterhüllkugel. In den sphärischen Robotern, die später von T. Urakubo [22] und Q. Jia [23] entwickelt worden sind, ist das Kreiselgerät nur mit einem einzigen Rotor ausgestattet. Die Rotorachse dieses Rotors kann ihre Richtung (Orientierung) relativ zu dem innerseitigen Raum der Hüllkugel ändern. So kann sowohl die Hauptbewegung des Roboters als auch die Veränderung seiner Bewegungsrichtung gewährleistet werden.

Die Hauptnachteile dieser Roboter ([22] und [23]) sind die Komplexität der Konstruktion des inneren Mechanismus und die hohen Genauigkeitsanforderungen bei der Herstellung ihrer Teile (u.a. die Kreiselrotoren).

Die Bewegung des von V. Joshi [24, 25] entwickelten Roboters wird von vier Rotoren gewährleistet. Jedes Rotorpaar, das sich auf einer Achse entgegengesetzt zueinander befindet, hat separate Antriebe. Wenn ein solcher Antrieb sein Rotorpaar beschleunigt, bewegt sich der Roboter in einer bestimmten Richtung. Beim gleichzeitigen Einsatz beider Antriebe kann der Roboter die Richtung der Bewegung ändern.

Durch die Experimente mit sphärischen Robotern, die sich mit Hilfe der Kreiselgeräte bewegen, sind folgende Ergebnisse erzielt worden. Diese Roboter können keine bedeutenden kinematischen und dynamischen Charakteristika erreichen. Aus diesem Grund wird das kinetische Moment für viele Roboter zusammen mit anderen Bewegungsverfahren verwendet (z.B. mit dem Verfahren der Verschiebung des Massenmittelpunkts des Roboters).

Der Roboter „Volvot“ [26] ist ein gutes Beispiel, bei dem beide Bewegungsverfahren realisiert worden sind. Im „Volvot“ liegen die Achse des Hauptbewegungsantriebes und die Achse des Kreiselrotorantriebs senkrecht. An den Enden der Achse des Kreiselrotorantriebs sind zwei exzentrische Rotoren befestigt. Wenn die Winkelgeschwindigkeit der Rotordrehungen relativ gering ist, wirkt gerade diese Exzentrizität auf die Hauptbewegung des Roboters; und wenn diese Geschwindigkeit hoch genug ist, überwiegt die Wirkung der Kreiselmomente in der Bewegung des Roboters.

Ein weiterer Roboter, der mit Hilfe zweier Bewegungsverfahren entwickelt worden ist, wird „Gyrover“ genannt [27]. Dieser ist an der Universität Carnegies-Mellon (USA) entwickelt worden. Der Kreiselrotor ist hierbei auf der Ballastmasse (auf dem Pendel) befestigt, die sich um die bewegungsunfähige zentrale Achse dreht. Dabei stimmt die Ebene des Kreisdrehens mit der Ebene des Drehens der Ballastmasse (Bild 1.11) überein.

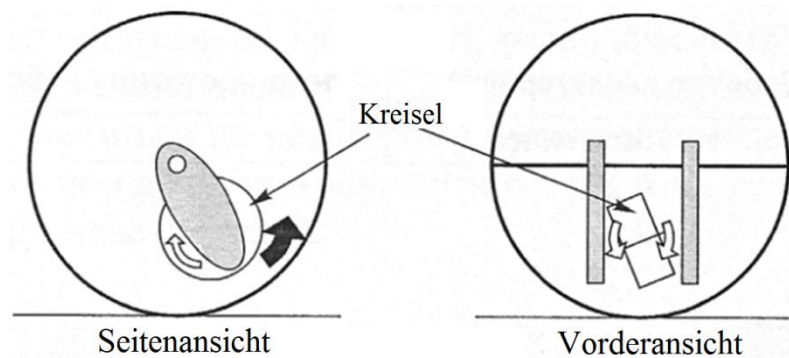


Bild 1.11: Stabilisierung der Hauptbewegung des Roboters mit Hilfe des Kreiselgeräts [4]
(der schwarze Pfeil verdeutlicht die Drehrichtung des Pendels, die weißen Pfeile geben die Richtungen der Drehung der Kreiselrotorachse an)

Der Roboter bewegt sich durch die Pendeldrehung um die zentrale Achse. Das Rollen der Hüllkugel entsteht mit der Winkelgeschwindigkeit ω (der Hüllkugel). Der Kreiselrotor dreht sich mit der Winkelgeschwindigkeit Ω . Wenn die Richtung der Kreiselrotorachse mit der Richtung der Zentralachse kongruiert, kongruieren auch die Richtungen der Vektoren $\vec{\omega}$ und $\vec{\Omega}$. Dabei entsteht kein Kreiselmoment. Durch die Wirkung äußerer Kräfte (z.B. Stoß) entsteht eine Neigung der Bewegungsebene des Roboters. Aus diesem Grund ändert sich die Bewegungsrichtung, und das weitere Rollen des Roboters wird kreisförmig. Um die Neigung der Bewegungsebene zu verhindern und die Hauptbewegung des Roboters zu stabilisieren, sollte sich die Achse des Kreiselrotors in Gegenrichtung zur Neigung der Bewegungsebene drehen.

Das Gehäuse des „Gyrover“ hat keine vollsphärische Form, um sich besser zu drehen und hohe Geschwindigkeiten der Hauptbewegung zu erreichen. Dieser Roboter verwendet drei Motoren: einen für die Hauptbewegung des Roboters, einen anderen für das Drehen des Kreiselrotors und einen dritten für die Drehung der Achse des Rotors.

Drei funkgesteuerte Prototypen des Roboters „Gyrover“ sind bereits konstruiert worden. Der erste Prototyp kann sich auf einer geneigten Ebene mit dem Neigungswinkel bis zu $4,5^\circ$ fortbewegen. Zudem kann er sich über unplanare Oberflächen (z.B. über einen Kieshaufen) mit einer Geschwindigkeit von bis zu 3,0 m/s bewegen. Der Roboter kann sich auch nach dem Seitwärtsfallen aus der Seitenlage mit Hilfe der Bewegung vorwärts und durch gleichzeitiges Drehen des Kreiselrahmens wieder aufrichten.

Weil der erste Prototyp des „Gyrover“ einen sehr hohen Energieverbrauch beim Einsatz des Kreiselgeräts gehabt hat, ist der Kreiselrotor des zweiten Prototyps mit einem äußeren Vakuummantel ausgestattet worden. So ist der Aufwand an Elektroenergie um 80% verringert worden. Dabei sind die Leistungen des zweiten und dritten Motors um das Doppelte vergrößert worden. Das Robotergehäuse des zweiten Prototyps ist auf der Grundlage des pneumatischen Reifens konstruiert worden, und der Roboter kann nicht nur auf einer festen Oberfläche, sondern auch auf dem Wasserweg fahren. Der dritte Prototyp hat den größten Durchmesser der Hüllkugel (0,40 m). Zudem ist der Roboter mit einem selbständigen kompakten Rechner bestückt worden, der nicht nur die Bewegungssteuerung ausführt, sondern auch Inspektionsdaten bearbeitet und weiterleitet. Dazu werden Kameras verwendet. Diese sind unter den zur Zentralachse des Roboters transparenten halbrunden Seitendeckeln befestigt. Das gesamte Gehäuse des „Gyrover“ besteht aus diesen Seitendeckeln, leichten Gummireifen und dem metallischen Kranz. Die Gesamtmasse des Roboters beträgt 7,0 kg, und er erreicht eine Geschwindigkeit von bis zu 4,5 m/s.

Eine Kombination eines Kreiselrotors und eines Pendels auf einer starren Achse hat G. Shu für seinen Kugelroboter [28] verwendet. Das Pendel kann sich hierbei um die eine Achse drehen. Der Kreiselrotorantrieb ist mit diesem Pendel fest verbunden (Bild 1.12). Das Drehen des schweren Kreiselrotors führt die Wendung des Roboters und die Änderung der Bewegungsrichtung aus.

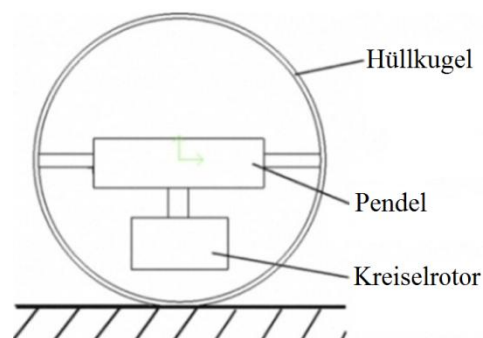


Bild 1.12: Kombination des Kreiselrotors und des Pendels auf einer starren Achse [28]

Die Roboter „BHQ-5“ [29] und „BHQ-3“ [9] führen die Hauptbewegung mit Hilfe eines Antriebsrads aus. „BHQ-5“ ist auch mit einem Kreiselgerät ausgerüstet, das drei Rotoren besitzt. Dieses Kreiselgerät kann nicht nur das auf den Roboter wirkende Rollmoment vergrößern, sondern auch die Orientierung des Roboters im Raum ändern. Dadurch sind die Roboter „BHQ-5“ und „BHQ-3“ fähig, sich an Ort und Stelle zu drehen.

Die Verwendung des Kreiselgeräts für die Bewegung des Kugelroboters hat einen wesentlichen Nachteil. Unter anderem wird die Bewegung des Roboters in der Richtung der x-Achse (siehe Bild 1.10) beschrieben. Die Kräfte F liegen in der zum Vektor des Kreiselmoments \overline{M}_g orthogonalen Ebene. Diese dreht sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω des Kreiselrahmens, in dem der Kreiselrotor gelagert ist. Dabei ändert die Ebene der

Kräfte F ihre Orientierung (sie dreht sich um die x -Achse). Aus diesem Grund wirken die Kräfte F auf den Roboter nicht konstant in die gleiche Richtung. Dadurch kann die Roboterbewegung unvorhersehbar sein.

Der Roboter kann dieses Problem mit Hilfe des doppelten Kreiselgeräts lösen. Dieses Kreiselgerät besteht aus zwei einaxialen Kreiseln (Bild 1.13) und ist in erster Linie für Trägheitsorientierungssysteme der Weltraumtechnik (Satelliten) [30] verwendet worden. Genau wegen des spezifischen Problems der Kräfteentwicklung beim Kreiselgerät hat G. Schroll zwei einaxialen Kreisel für seinen Kugelroboter konstruiert [31-33]. Dieser Roboter bewegt sich erfolgreich auf komplexem Terrain bzw. überwindet kleine Hindernisse und hat die Möglichkeit, sehr schnell zu beschleunigen und zu bremsen. Das Kreiselgerät des Schroll-Roboters wird in erster Linie für die Verbesserung der dynamischen Eigenschaften der Roboterbewegung (u.a. die Beschleunigung) verwendet.

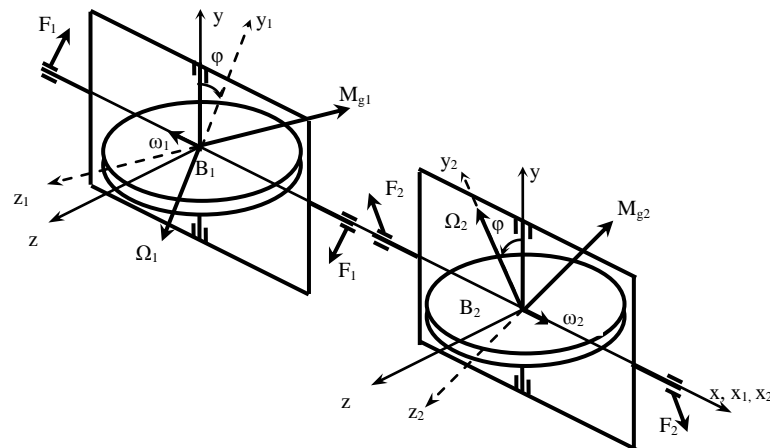


Bild 1.13: Kinematisches Schema des doppelten Kreiselgeräts, das aus zwei einaxialen Kreiseln besteht

Dieses Kreiselgerät lässt sich wie folgt kurz beschreiben:

Die Trägheitsmomente der Kreiselrotoren sind $I_1 = I_2 = I$. Die Rotormassen sind $m_1 = m_2 = m$. Beide Rotoren drehen sich in Gegenrichtung zueinander mit den Winkelgeschwindigkeiten $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$. Bei der gegengerichteten Drehung des Kreiselrahmens mit den Winkelgeschwindigkeiten $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ entstehen zwei gleichgroße Kreiselmomente $M_{g1} = M_{g2} = I \cdot \Omega \omega$. Zudem sind die Vektorrichtungen dieser Kreiselmomente gleich, und das Gesamtmoment ist $\overline{M}_g = \overline{M}_{g1} + \overline{M}_{g2}$. Es hat eine konstante horizontale Richtung, die senkrecht zur Ebene der Roboterhauptbewegung liegt (die Roboterbewegung entsteht entlang der x -Achse). In dieser Ebene liegen auch die den Kraftmomenten \overline{M}_{g1} und \overline{M}_{g2} entsprechenden Kräftepaare $\overline{F} = \overline{F}_1 + \overline{F}_2$. Diese wirken nicht auf die Richtung der Roboterbewegung, aber sie können den Roboter beschleunigen oder bremsen. Durch die bestimmten gegenseitigen Drehungen der Wirkungsebene dieser Kräftepaare (der Kreiselrahmendrehung) entsteht das Gesamtmoment \overline{M}_g in der benötigten (u.a. konstanten) Richtung.

Aber das doppelte Kreiselgerät hat folgende Nachteile:

Der Wert des gesamten Kreiselmoments $M_g = 2I \cdot \Omega \omega \cdot \cos \varphi$ ist nicht konstant, wenn die Winkelgeschwindigkeit der Kreiselrahmen konstant ist. Wenn aber das Robotersteuerungssystem eine Änderung der Winkelgeschwindigkeit ω der Kreiselrahmendrehung gewährleisten soll, muss die folgende Bedingung:

$$\omega \cdot \cos\varphi = \omega_0 = \text{const}, \text{ also } \omega(\varphi) = \omega_0 \cdot \cos^{-1}\varphi$$

erfüllt sein. Dadurch wird die Größe des vom Kreiselgerät entwickelten Hilfsmoments konstant. Diese Verbesserung des Steuerungssystems des Kugelroboters ermöglicht somit eine einwandfreie Funktionsweise.

Die Vektorrichtung des Moments kann sich auch ändern. Wenn die Drehwinkel der Kreiselrahmen $\varphi > 90^\circ$ werden, ändert sich die Richtung der Kreiselmomentwirkung. Wenn beispielsweise eine Beschleunigung des Roboters durch die Drehung der Kreiselrahmen entsteht, beschleunigt das Kreiselgerät nach der Rahmendrehung um den Winkel $>90^\circ$ den Roboter nicht, sondern bremst (die Wirkungsrichtung des Kreiselmoments ändert sich entgegengesetzt).

Um diesen Nachteil zu auszugleichen, können folgende Verfahren angewendet werden. Wenn die Drehwinkel des Kreiselrahmens die Werte von 90° bzw. von 270° erreichen (die Rahmenebenen sind horizontal), sollten die Drehrichtungen der Kreiselrotoren sich gegenseitig ändern. Aber dieses Verfahren ist sehr kompliziert, weil die Rotorwinkelgeschwindigkeiten relativ hoch sind.

1.2.3. *Bewegungsverfahren mit Hilfe der Hüllkugelverformung/ Hüllkugeltransformation*

Dieses Bewegungsverfahren ist erst in den letzten zehn Jahren verwendet worden, um Kugelroboter nach genau diesem Schema zu bauen. Ein Beispiel dieser Konzeption ist der Roboter von Natthaphon Bunathuek [34]. Seine Hüllkugel besteht aus zwei halbsphärischen Elementen mit drei "Beinen", die mit Mechanum-Rädern ausgestattet sind. Für den Transport kann der Roboter in eine kompakte Sphäre transformiert werden. Am Einsatzort wird der Roboter in seine Lauf-Form transformiert, die für die Bewegung die mit den Rädern ausgerüsteten Beine verwendet. Die Bewegung dieses Roboters in der sphärischen Konfiguration ist nicht möglich, aber die entsprechende Verbesserung der Konstruktion kann ein Ziel der weiteren Forschung sein.

Der sphärische Roboter „Kisbot I“ [35] ist mit einem herausfahrbaren "Bein" (dieses hat zwei Führungen) ausgestattet. Dieser Roboter kann zwei Bewegungsarten ausführen: das Rollen durch die Verschiebung der Ballastmasse (des Pendels) und die Bewegung mit Hilfe des "Beins" (wenn das Bein heraus und hinein fährt).

Wenn das Bein in den Hüllkörper eingezogen ist, führt der Roboter die Hauptbewegung mit Hilfe des Pendels aus. Im «Radregime», wenn dieses Bein ausgefahren ist, kann sich der Roboter auf einer geneigten Oberfläche bewegen oder Hindernisse wie eine Stufe überwinden bzw. am Ende der Bewegung bremsen (Bild 1.14).

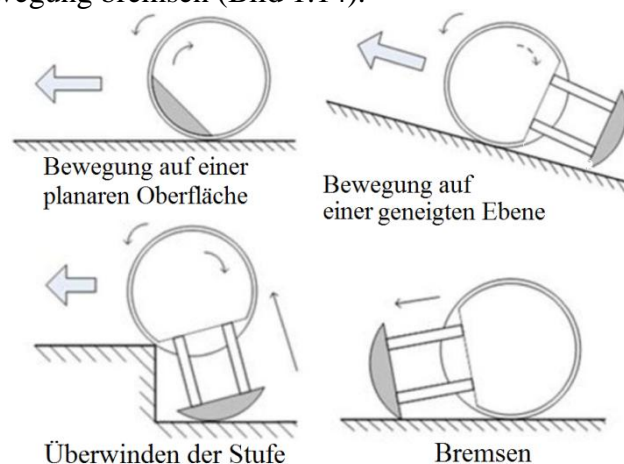


Bild 1.14: Mögliche Bewegungen von „KisBot I“ [3]

Ein Hauptnachteil von „Kisbot I“ ist die Schwierigkeit, die Luft- und Wasserdichtheit der Hüllkugel zu gewährleisten (Dichtungen der Führungen des Beins). Zudem ist die Roboterkonstruktion kompliziert.

In [36] ist die Hüllkugelverformung für die Roboterbewegung anstatt des inneren mechanischen Systems verwendet worden. Die Hüllkugel des Roboters besteht aus vier separaten Sektionen. Diese sind aus dielektrischem Stoff hergestellt und können sich unter der Wirkung eines elektromagnetischen Felds verformen. Die konsequente Verformung der Sektionen der Hüllkugel bewegt den Roboter. Bei der Entwicklung eines anderen Roboters [37] ist diese Idee ebenfalls verwendet worden, aber die Verformung der Roboterhüllkugel kann mit Hilfe des Luftdrucks aus Druckspeichern ausgeführt werden. Die separaten Kammern (die Ballone) des Kugelgehäuses (Bild 1.15) können sowohl aufgepumpt als auch abgepumpt werden. Alle Kammern befinden sich jeweils auf der äußeren Oberfläche der Hüllkugel, wobei die Anzahl dieser Kammern sehr hoch ist (dieses Bewegungsprinzip kann nur mit einer bestimmten Anzahl von Kammern verwendet werden). So kann der Roboter sich in alle beliebigen Richtungen bewegen.

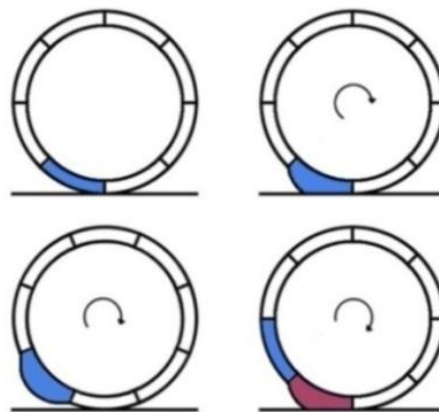


Bild 1.15: Schema der Roboterbewegung mit Hilfe der Hüllkugelverformung [3]

1.2.4. Fazit

Die Analyse der Konzeptionen und der Verfahren der Bewegung der sphärischen Roboter ergibt, dass folgende Einsatzanforderungen bei der Entwicklung bzw. der Konstruktion solcher Roboter in erster Linie zu berücksichtigen sind:

1. Wenn die Autonomie des Roboters ein wichtiger Parameter ist, ist die Auswahl des dritten und sechsten Bewegungsprinzips (der mobilen Massen/des Pendels und der Ballastmassen auf einer beweglichen Achse) für die Roboterkonstruktion am besten.
2. Wenn der Roboter sich in einem beschränkten (eingeschränkten) Raum bewegen soll, werden am besten das zweite Bewegungsprinzip (der Roboter mit dem federbelasteten inneren Bein), das dritte Prinzip (die mobilen Ballastmassen/das Pendel), das sechste Bauschema (die Ballastmassen/das Pendel auf einer beweglichen Achse) und das siebte Bewegungsprinzip (die Laufkatze mit den Mecanum-Rädern/Allseitenrädern) ausgewählt. Gerade dann ist eine Drehung des Roboters an Ort und Stelle möglich.
3. Wenn der Roboter eine Bewegung außerhalb von Gebäuden („outdoor“) auf einer planaren Oberfläche ausführen soll, werden das erste Bewegungsprinzip (die innere Laufkatze) und das fünfte Bauschema (die Ballastmassen/das Pendel auf einer beweglichen Achse) ausgewählt. Zusätzlich könnten hier auch die Schemata mit dem Kreiselgerät und mit der Verformung des Kugelgehäuses verwendet werden.
4. Wenn der Roboter sich auf dem Wasserweg fortbewegen soll, so wird am besten das vierte Prinzip (die halbsphärischen Räder) ausgewählt.

1.3. Sphärische Sprungroboter

1.3.1. Problemstellung und der Stand der Technik

Sphärische Roboter, die sich auf einer planaren Oberfläche bewegen, sollen oft verschiedene zahlreiche Hindernisse überwinden. Dabei können mögliche gestufte und steinige Hindernisse für den Kugelroboter problematisch sein. Beim Kontakt der Hüllkugel mit solchen Hindernissen sollte sich der Massenmittelpunkt des Roboters hinter dem Kontaktpunkt (z.B. mit der Stufe) in der der Roboterbewegungsrichtung (Bild 1.16) befinden.

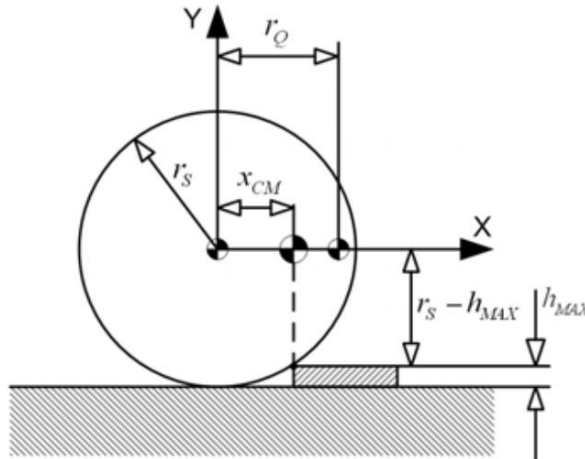


Bild 1.16: Schema der Überwindung eines stufenförmigen Hindernisses beim Kugelroboter [90]

Die Hauptbewegung des Roboters ist mit Hilfe der Drehung des Pendels mit der Masse m_Q möglich. Der Pendelmassenmittelpunkt liegt im Abstand r_Q vom Zentrum der Hüllkugel, die eine Masse m_S und den Radius r_S hat. Dann ist die horizontale Koordinate des gesamten Massenmittelpunkts des Roboters:

$$x_{CM} = \frac{m_Q \cdot r_Q + m_S \cdot 0}{m_Q + m_S} . \quad (1.1)$$

Laut Bild 1.16 folgt die Gleichung:

$$x_{CM}^2 = r_S^2 - (r_S - h_{MAX})^2 .$$

Damit ist die maximale Höhe des zu überwindenden Hindernisses:

$$h_{MAX} = r_S - \sqrt{r_S^2 - \left(\frac{m_Q \cdot r_Q}{m_Q + m_S} \right)^2} . \quad (1.2)$$

Es ist offensichtlich, dass die Höhe h_{max} größer wird, je mehr sich der Radius r_S des Körpers vergrößert bzw. je größer die Beziehung der Masse des Pendels zur Gesamtmasse des Roboters ist. Diese maximale Höhe (h_{max}) wird auch größer, wenn der Massenmittelpunkt des Pendels sich relativ vom Massenmittelpunkt der Hüllkugel entfernt. Dieser Abstand hängt vom Radius des Kugelgehäuses ab. Für die sphärischen Roboter gilt (infolge der realen Konstruktionsbeschränkungen durch die geometrischen und Massenträgheitscharakteristika ihrer Elemente) die maximale Höhe des zu überwindenden Hindernisses beim Rollen mit Hilfe des Pendels nicht mehr als die Hälfte des Radius r_S [2]. Wegen dieser Beschränkung sind die sphärischen Sprungroboter im Entwicklungsstadium. Diese können hohe Hindernisse durch einen Sprung überwinden.

Y. Sugiyama und S. Hirai [38,39] haben einen sphärischen Roboter entwickelt, der aufgrund des Bewegungsprinzips der mobilen Massen konstruiert worden ist, aber kein Pendel hat. Der Roboter kann sich nicht nur auf einer planaren Oberfläche bzw. einer geneigten Ebene (der

Winkel dieser Ebene ist kleiner gleich 20°) bewegen, sondern auch Hindernisse von einer Höhe bis zu 0,08 m mit Hilfe eines Sprungs überwinden. Um alle diese Fähigkeiten gewährleisten zu können, ist für den Roboter das verwendete Bewegungsverfahren konstruktiv sehr untypisch realisiert worden. Eine bewegliche Masse ist nicht als Pendel, sondern als Kugel hergestellt worden, die auf Stricknadeln hängt. Diese Stricknadeln verbinden die zentrale Kugel (sie besteht u.a. aus Akkus und der Elektronik) und das äußere weiche Gehäuse des Roboters miteinander. Der Sonderwerkstoff der Stricknadeln hat die Möglichkeit, sich seine Form zu „merken“ (Formgedächtnisstoff). So können sich die Stricknadeln unter elektrischem Strom verformen (sich verlängern oder verkürzen) und die schwere zentrale Kugel relativ zum Kontaktpunkt (zwischen dem Roboter und der Bewegungsfläche) verschieben. Bei dieser Verschiebung entsteht das Rollen des Roboters durch die Bewegung des Massenmittelpunkts. Deswegen kann der Roboter sich durch diese Stricknadelverformung in beliebige Richtungen bewegen.

Die Gesamtmasse des Roboters beträgt nur 0,0036 kg (3,6 g – extra leicht), das Gehäuse hat den äußeren Durchmesser von 0,04 m, und die Höchstgeschwindigkeit des Roboters liegt bei 0,026 m/s. Bei der Vergrößerung der Prototypen ist der Roboter mit Sensoren ausgestattet worden. Durch die weitere Entwicklung dieser gebauten Prototypen ist die Konstruktion universeller Roboter möglich, die sich auf beliebigen Oberflächen bewegen können.

Ein gutes Beispiel für den sphärischen Sprungroboter ist der „JollBot“. Dieser Roboter ist von R. Armour (Bath, UK) konstruiert worden [40,41]. Das Foto des „JollBot“ und sein 3D-Modell sind in Bild 1.17 dargestellt.

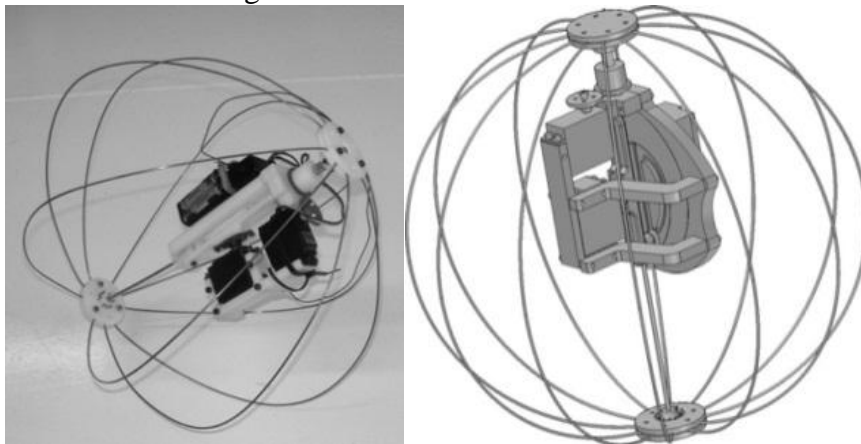


Bild 1.17: Roboter „JollBot“ [41]

Die Hüllkugel dieses Roboters besteht aus metallisch flexiblen halbrunden Reifen. Bei der Deformation solcher Hüllkugeln durch Kompression entlang der zentralen Achse, die die Reifenenden verbindet, wird potentielle Energie gesammelt. Die zentrale Achse kann sich mit Hilfe des Zugmechanismus verkürzen und sich in dieser verformten Position durch eine Feststelleinheit fixieren. Für die Überwindung eines Hindernisses kann der Roboter den Sprung in Richtung der zentralen Achse ausführen, wenn die Feststelleinheit die verformte Achse loslässt. Denn die augenblickliche Freisetzung der gesammelten potentiellen Energie geschieht durch genau dieses Loslassen der Feststelleinheit. Die maximale Sprunghöhe des Roboters ist erreichbar, wenn ein Ende der verformten Achse in Kontakt mit der Bewegungsoberfläche ist. Die Phasen der Hüllkugelverformung des „Jollbot“ und die Veränderung der Orientierung seiner zentralen Achse beim Sprung sind in Bild 1.18 verdeutlicht.

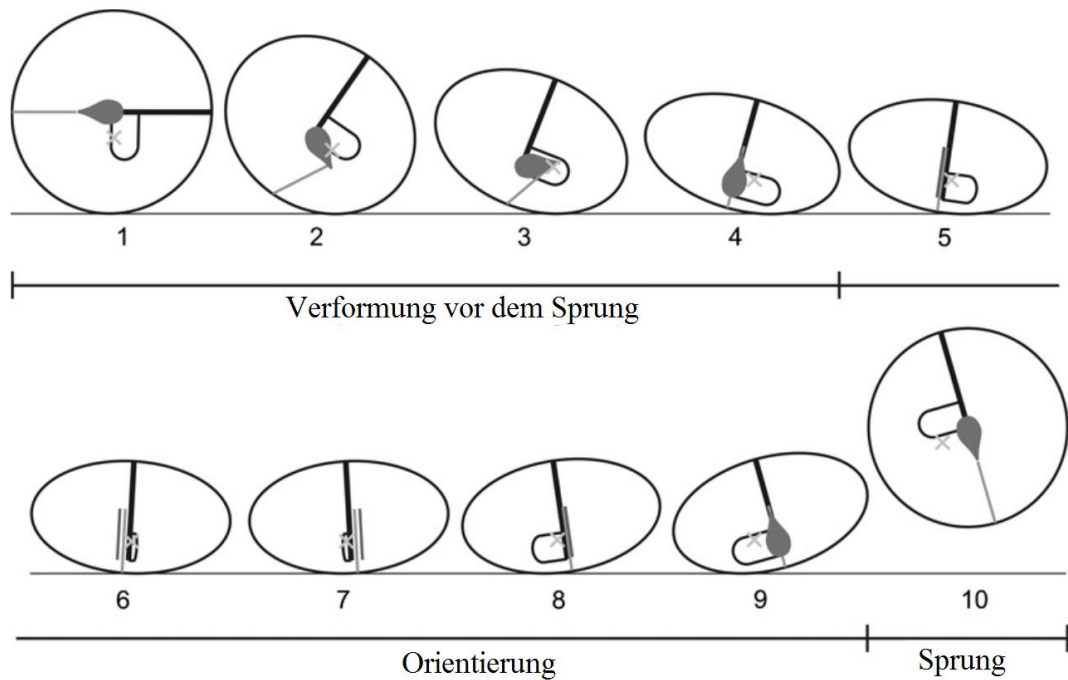
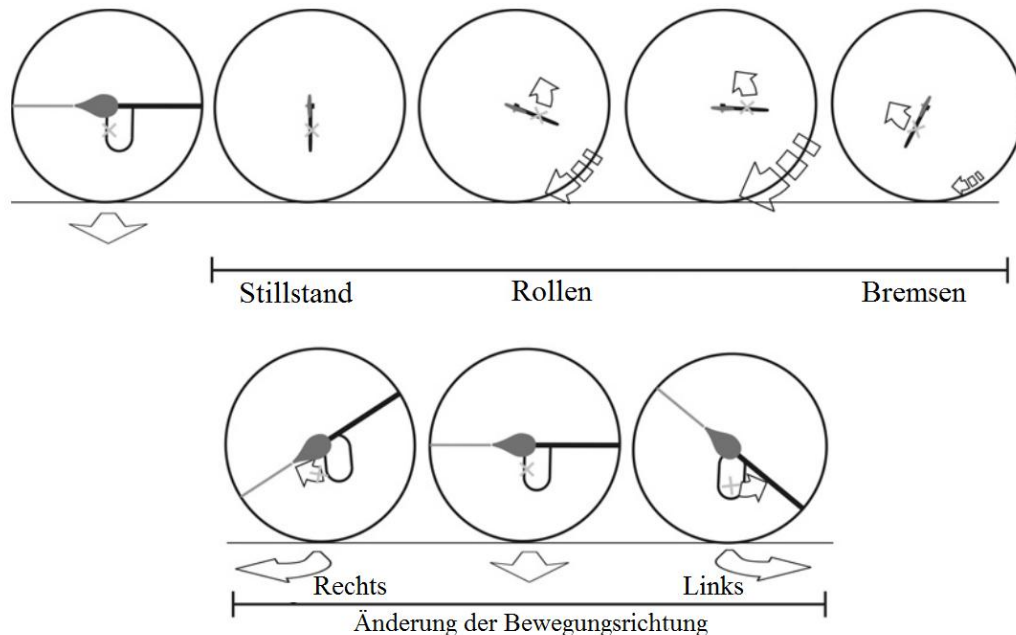


Bild 1.18: Phasen der Hüllkugelverformung des Roboters „JollBot“ und Änderung der Richtung der Zentralachse beim Sprung [41]

Für die Hauptbewegung des „JollBot“ ist das Prinzip der Ballastmassen auf einer bewegungsunfähigen Achse (siehe Bild 1.6) angewendet worden. Beim Bewegungsprinzip soll sich die zentrale Achse des Roboters senkrecht zur Roboterrollenebene befinden. Durch die Verschiebung der Ballastmasse entlang dieser Achse kann die Richtung der Hauptbewegung (Bild 1.19) geändert werden.



× Massenmittelpunkt des Roboters

Bild 1.19: Schema der Hauptbewegung und der Änderung der Bewegungsrichtung des Roboters „JollBot“ [41]

Das Steuersystem des Roboters für die Hauptbewegung und für die Vorbereitung des Sprungs ist kompliziert. Es muss den Zugmechanismus sowie die Feststelleinheit steuern. Außerdem soll die zentrale Achse vor dem Sprung des Roboters für einen kurzen Zeitraum in eine geforderte Richtung orientiert sein. In dieser Position der Achse muss der Gesamtmassenmittelpunkt der inneren Elemente niedriger als der Massenmittelpunkt der

Hüllkugel sein. Nach dem Sprung sollte das Steuersystem weiter die Hauptbewegung des Roboters gewährleisten.

Die Gesamtmasse des letzten (dritten) Roboterprototyps beträgt 0,85 kg. Der äußere Durchmesser der Hüllkugel beträgt 0,58 m. Die Bewegungsgeschwindigkeit, die der Roboter erreichen kann, liegt bei bis zu 1,2 m/s. Die maximale Sprunghöhe ist 0,45 m. Der Sprungabstand, der dabei entstehen kann, hängt jeweils von der Geschwindigkeit des Roboters ab und kann einen Wert von einem Meter erreichen.

Die „diskrete“ Bauart der Hüllkugel des „Jollbot“ sowie die häufige Verformung der Reifen der Hüllkugel schränken die Haltbarkeit des Roboters ein. In diesem Zusammenhang sollte ein Vollgehäuse für den sphärischen Sprungroboter verwendet werden.

Ein anderer Sprungroboter ist von B. Li [42] entwickelt worden. Dieser Kugelroboter ist mit einem Doppelpendel ausgestattet, das mit einem Sprungmechanismus verbunden ist. Das 3D-Schema des Roboters ist in Bild 1.20 dargestellt.

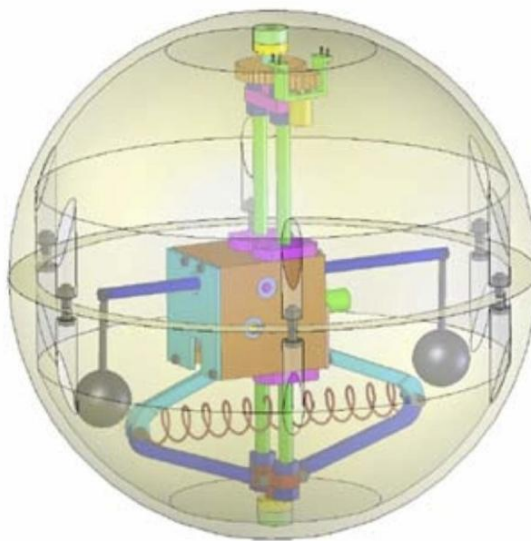


Bild 1.20: Sphärischer Roboter mit einem Sprungmechanismus [3]

Für die Hauptbewegung des Roboters ist das Prinzip der Ballastmassen auf einer beweglichen Achse verwendet worden (siehe Bild 1.8). Die Abhängungsachse des doppelten Pendels befindet sich senkrecht zur zentralen Achse des Roboters. Diese zentrale Achse ist mit der Hüllkugel des Roboters fest verbunden und dreht sich mit Hilfe eines Antriebs (eines mit Getriebe ausgerüsteten Motors). Mit dieser Achse kann sich auch der zentral bewegliche Block mit dem doppelten Pendel drehen, um die Richtung der Hauptbewegung des Roboters zu ändern.

Die Hauptelemente des Sprungmechanismus sind der zentral bewegliche Block und der mit diesem Block verbundene Zugmechanismus der Feder. Durch die Bewegung des Blocks entlang der zentralen senkrechten Achse wird die Feder verlängert. Dann fixiert eine Feststelleinheit den Block, und die Feder speichert potentielle Energie. Um den Sprung auszuführen, lässt die Feststelleinheit den Block los. Die Federenergie beschleunigt den beweglichen Block, dadurch bewegt er sich dann sprunghaft nach oben und schlägt an die Hüllkugel. Weil dieser Stoß in den Bauelementen unelastisch, aber nicht plastisch ist, führt der Roboter einen Sprung aus.

Wichtig! Die Positionierung der Feder des Roboters (siehe Bild 1.20) und die Bauart des gesamten Sprungmechanismus sind nicht optimal. Die Energie wird nicht direkt übertragen, sondern durch eine Parallelogrammführung übergeben. Deswegen hat dieser Mechanismus Energieverluste.

1.4. Technische Anforderungen an den in der Dissertation entwickelten Roboter

Die technischen Anforderungen an den Roboter, der im Entwicklungsprozess steht, sollen vom Verwendungszweck des Roboters bestimmt werden (Inspektionszwecke und Bewegung auf komplexem Terrain). Also ergeben sich Roboteranforderungen wie folgt:

1. Der Roboter muss eine hohe Geländefähigkeit besitzen. Er soll sich auf beliebigem Terrain bewegen (u.a. Gras, Sand, Schnee, Steine). Der Roboter soll auch kleine Wasserhindernisse überwinden können (z.B. Rinnsal). Deswegen muss die Hüllkugel des Roboters luft- und wasserdicht sein.
2. Der Roboter muss die Bewegung mit den notwendigen dynamischen Parametern ausführen können. Die maximale Lineargeschwindigkeit des Roboters bei der Hauptbewegung soll 1,25 m/s erreichen, die Beschleunigungszeit für diese Geschwindigkeit darf nicht länger als 1-1,5 s sein. Das Steuerungssystem muss sich zudem durch eine gewisse Einfachheit auszeichnen.
3. Der Roboter muss kompakt sein und soll keine Sonderstoffe (u.a. spezifische Legierungen) für die Herstellung benötigen. Der Hüllkugeldurchmesser muss maximal 0,5-0,6 m betragen, die Gesamtmasse des Roboters soll 25 kg nicht überschreiten (bis zu 5 kg von der Gesamtmasse müssen für eine Nutzlast reserviert sein).
4. Der Roboter soll Hindernisse von einer Höhe bis zu 0,1-0,12 m überwinden können (z.B. kleine Stufen). Diese Anforderung muss der Roboter zudem auf einem steinigem Terrain erfüllen können.
5. Der Roboter muss eine hohe Autonomiefähigkeit besitzen. Die Akkus sollen den Roboterbetrieb über 5-6 Stunden gewährleisten. Eine „ideale“ Betriebszeit kann bis zu 12 Stunden erreichen.
6. Die Festigkeit des Roboters gegen äußere Betriebsbelastungen (u.a. Stöße) muss hoch sein.
7. Der Roboter soll preiswert sein. Die für die Herstellung notwendigen Kosten sollen niedriger sein als die für andere Kugelroboter in dieser Größe.
8. Die Roboterelemente sollen keine so komplexe Bauart haben, dass sie für die Herstellung Mehraxial-CNC-Maschinen (vier- und fünfaxial) benötigen.

Aus der beschriebenen Bauart des Kugelroboters kann Folgendes abgeleitet werden:

Um die notwendigen Anforderungen zu realisieren, soll der zu entwickelnde sphärische Roboter die Mechanismen, Ideen und Bewegungsverfahren aus mehreren Bauarten verbinden. Der Hauptbewegungsantrieb kann nach der Bauart der Ballastmassen auf einer unbeweglichen Achse konstruiert werden. Diese Achse wird mit der Roboterhüllkugel fest verbunden, und die Ballastmasse (das Pendel) hat auf dieser Achse eine zweiachsig Abhängung. Die Verbindung zwischen der Achse und der Hüllkugel kann mit Hilfe von geflanschten Seitendeckeln realisiert werden, um Platz für die Videosensoren (auf diesen Seitendeckeln) zu schaffen. Das Pendel des Roboters soll mit einem Kreiselgerät ausgerüstet werden, um ein Hilfsmoment für die Verbesserung der Bewegungsparameter (u.a. die Beschleunigung) zu gewährleisten. Das Kreiselgerät stabilisiert zudem die Bewegung des Roboters.

Der sich innerseitig der Hüllkugel befindende Sprungmechanismus soll die Überwindung hoher Hindernisse ermöglichen. Der Sprungmechanismus und das Pendel können eine Baugruppe bilden. So kann die schwere zentrale Ballastmasse die effektive Bewegung des Roboters und die Änderung der Bewegungsrichtung gewährleisten.

Die Entwicklung der Konstruktionsverfahren des sphärischen Roboters und die entsprechende dynamische Analyse bzw. die weitere Herstellung des Roboterprototyps sind sehr wichtige

und aktuelle Aufgaben, um eine Erhöhung der Effektivität von mobilen Robotern/All-Terrain-Robotern zu erreichen.

1.5. Forschungs- und Entwicklungsziele

Das Hauptziel der Arbeit ist die Effizienzverbesserung des Kugelroboters, der für Navigations-, Verlese- und Inspektionszwecke verwendet werden kann. Dafür muss der Roboter mit den inneren Mechanismen ausgerüstet werden, die die Bewegung stabilisieren und die Hindernisse überspringen lassen.

Dem Ziel entsprechend ergeben sich für die Arbeit folgende Aufgaben:

1. Entwicklung eines kinematischen Schemas für Kugelroboter
2. Entwicklung eines prinzipiellen Schemas für Sprungmechanismen
3. Entwicklung einer prinzipiellen Bauart für Roboter
4. Entwicklung eines mathematischen Modells für Hauptbewegung des Roboters
5. analytische Erforschung bestimmter Sonderfälle der Roboterbewegung
6. Entwicklung eines Modells des Roboters und seines Steuerungssystems mit Hilfe einer MATLAB-Software
7. Simulation und Erforschung verschiedener Bewegungstypen des Roboters
8. Bewertung der benötigten Kraftmomente der Roboterantriebe mit Hilfe einer MATLAB-Simulation
9. Auswahl von Motoren, Controllern und Akkus nach benötigten Parametern
10. Entwicklung von Teilen, Baugruppen und Mechanismen des Roboters (Kreiselgerät, Haupttragwerk, Führungen, Sprungmechanismus, Hüllkugel)
11. Entwicklung und Verbesserung des Steuerungssystems des Roboters
12. Herstellung des Roboters sowie Ausführung von Tests zur Prüfung seiner Funktionalität
13. Fazit: Ergebnisse dahingehend überprüfen, ob die Robotereigenschaften dem vorgegebenen Ziel und den möglichen Einsatzbereichen entsprechen
14. Empfehlungen und Vorschläge für die weitere Verbesserung des Roboters und seines Steuerungssystems

1.6. Wissenschaftliche und Ingenieursnovität der Arbeit

1. Das neue kinematische Schema des Kugelroboters wird aufgestellt und praktisch ausgeführt. Bei diesem Schema sind der Sprungmechanismus des Roboters und das Kreiselgerät zum ersten Mal innerhalb der Hüllkugel des Roboters nach dem Prinzip des sphärischen Pendels entwickelt worden.
2. Das Arbeitsprinzip des Sprungmechanismus wird aufgestellt und praktisch ausgeführt. Das Arbeitsprinzip basiert auf der Speicherung und der weiteren Verwendung der potentiellen Energie der Feder für den Sprung.
3. Die Gleichungen der Hauptbewegung des zu entwickelnden Kugelroboters werden erstellt.
4. Die Sondertypen der Roboterbewegung sind theoretisch erforscht, die Verfahren für die Beurteilung der Robotermöglichkeit für das Überwinden von Hindernissen angeboten worden.
5. Die untypischen Sonderkomponenten des Kugelroboters wie die runden äquatorialen Führungen sind entwickelt und hergestellt worden. Die Bauart des Zugsystems des Sprungmechanismus ist angeboten und entwickelt worden.
6. Der neue Pendelabhängungsbau für die Kugelroboter ist entwickelt und hergestellt worden.

Ingenieursnovität der Arbeit: Die für die Roboterentwicklung ausgeführten Forschungsarbeiten, mathematischen Simulationen und neuen Bauarten der Roboter-elemente können in weiteren Forschungs- und Ingenieursarbeiten im Bereich der Kugelroboter verwendet werden.

2. KINEMATISCHES SCHEMA DES ROBOTERS MIT EINEM SPHÄRISCHEN PENDEL UND DIE BEWEGUNGSGLEICHUNGEN DES ROBOTERS

Das Kapitel 2 ist in zwei Teile unterteilt.

Im ersten Teil wird die Entwicklung des kinematischen Schemas des Roboters beschrieben. Zuerst wird ein prinzipielles Schema des Roboters konstruiert, danach entsteht die Entwicklung der Schemata der Hauptelemente (Sprungmechanismus und Kreiselgerät) und im letzten Schritt wird ein gesamtes detailliertes kinematisches Schema des Roboters durch die Verbindung dieser Elementeschemata konstruiert.

Im zweiten Teil dieses Kapitels werden die Bewegungsgleichungen des Roboters entwickelt und analysiert.

2.1. Hauptelemente des Roboters und seine Bewegungsverfahren

Der Roboter bewegt sich schlupffrei auf einer ebenen horizontalen Oberfläche XZ (sogenannte *Hauptbewegung des Roboters*). Normalerweise haben Kugelroboter ein einfaches Pendel, das nur eine Aufhängachse hat. Aber der Roboter in dieser Arbeit hat ein Pendel, das zwei Aufhängachsen hat. Es ist ein sogenanntes *sphärisches Pendel*.

Der Aufhängpunkt des Pendels und der Massenmittelpunkt des Kugelgehäuses liegen jeweils im Punkt C.

Ein prinzipielles Schema des Roboters ist in Bild 2.1 dargestellt, veranschaulicht durch zwei Koordinatensysteme: ein starres OXYZ-Koordinatensystem und ein halbstarres Cxyz-Koordinatensystem.

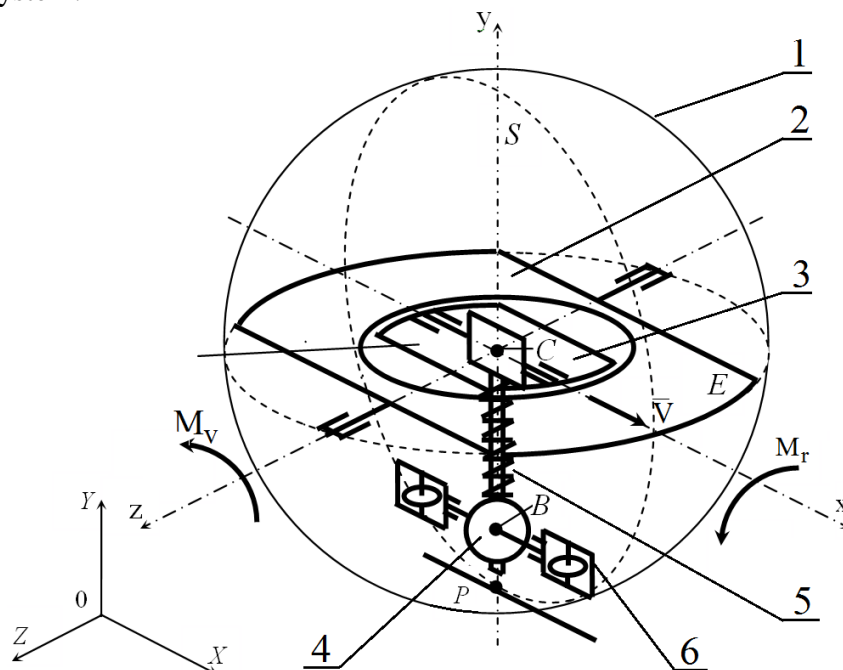


Bild 2.1: Prinzipielles Schema des Roboters

Hauptelemente:

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| 1 –sphärische Hüllkugel | 4 –sphärisches Pendel |
| 2 –Hauptplattform | 5 –Sprungmechanismus |
| 3 –Drehplattform | 6 –Einaxialkreisel. |

sphärisches Pendel:

Der Massenmittelpunkt des Pendels kann auf die sphärische Oberfläche geführt werden, die den Radius CB hat (Schema des Roboters in Bild 2.1).

Hauptplattform:

Das ist eine Plattform, die sich um die Achse z drehen kann. Diese Achse ist mit dem Kugelgehäuse des Roboters fest verbunden.

Drehplattform:

Das ist eine Plattform, die sich um die Achse y drehen kann, wobei die Achse y senkrecht zur Ebene der Hauptplattform liegt.

Hauptbewegung des Roboters:

Der Roboter bewegt sich geradlinig auf der flachen horizontalen Ebene.

Im Schema 2.1 ist erkennbar, dass das Pendel des Roboters auf zwei kreuzsenkrechten Achsen x und z hängt, die sich in der äquatorialen Ebene des Kugelgehäuses E befinden (Kardanaufhängung). Um das Pendel um diese Achsen zu kippen (umzudrehen), muss der Roboter mit zwei Antrieben ausgerüstet werden. Diese Antriebe entwickeln zwei Kraftmomente: M_v um die z -Achse (Kraftmoment der Hauptbewegung) und M_r um die y -Achse (Kraftmoment für die Änderung der Bewegungsrichtung).

Der Roboter führt die *Hauptbewegung* mit der Geschwindigkeit V mit Hilfe des Kraftmoments M_v aus. Das Kraftmoment M_v wirkt auf die *Hauptplattform*. Durch diese Momentwirkung drehen sich die *Hauptplattform* und das *sphärische Pendel* in der XY -Ebene um die z -Achse. Dadurch verlagert sich der Massenmittelpunkt des Roboters (Punkt B) relativ zum Kontaktpunkt P zwischen dem Roboter und der Bewegungsebene. Die Verlagerung des Punkts B liegt in Richtung der x -Achse. So entwickelt sich das Rollmoment, das in der Robotersymmetrieebene S liegt. Diese S -Ebene ist eine Ebene der *Hauptbewegung* des Roboters.

Der Roboter führt die *Änderung der Richtung der Hauptbewegung* durch das Kraftmoment M_r aus. Dieses Moment wirkt um die x -Achse auf die *Hauptplattform*. Durch diese Momentwirkung drehen sich die *Hauptplattform* und das *sphärische Pendel* in der ZY -Ebene um die x -Achse. Dadurch verlagert sich der Punkt B relativ zum Kontaktpunkt P , und diese Verlagerung liegt in Richtung der z -Achse. Deswegen entwickelt sich das Rollmoment, das in der vertikalen Robotersymmetrieebene liegt (diese Ebene liegt zur S -Ebene senkrecht). Durch die Wirkung dieses Rollmoments ändert der Roboter die Richtung seiner *Hauptbewegung*.

2.2. Sprungmechanismus

Um hohe Hindernisse überwinden zu können, ist der Roboter mit einem Sprungmechanismus ausgerüstet. Dieser Mechanismus des Roboters, der eine Feder auf dem hängenden sphärischen *Pendel* CB hat (Bild 2.1), funktioniert nach folgendem Prinzip: die Feder mit der Federzahl c ist verformt und durch eine Feststelleinheit befestigt. Die Federverlängerung ist x , die Federkraft ist $F = cx$. Wenn die Feststelleinheit gelöst wird, schlägt das Pendel durch die Federkraft an die Hüllkugel. Die Masse des Pendels ist m_2 , die Pendelgeschwindigkeit beim Schlag ist V_2 . Nach dem Energieerhaltungssatz folgt also:

$$\frac{m_2 V_2^2}{2} = \frac{c x^2}{2}. \quad (2.1)$$

Die *Hüllkugel* des Roboters entwickelt beim Schlag die Geschwindigkeit V_1 . Wenn der Schlag unelastisch ist [43], folgt nach dem Impulserhaltungssatz:

$$(m_1 + m_2) V_1 = m_2 V_2, \quad (2.2)$$

wodurch m_1 die Masse der *Hüllkugel* ist.

2.3. Kreiselgerät des Roboters

Um die dynamischen Eigenschaften des Roboters (z.B. die Beschleunigung) zu verbessern, wird ein Kreiselgerät im Roboter verwendet. Dieses Gerät besteht aus zwei einaxialen Kreiseln und befindet sich innerseitig in der Roboterhüllkugel. Diese sichert die Luftdichtheit und Symmetrie des Roboters.

Der einaxiale Kreisel findet eine breite Anwendung [79,84]. Beispielsweise wird er als Schiffsstabilisator benötigt (sogenannter Schlickkreisel oder Schlingendämpfer [73,74,83]). Das Bauschema und das kinematische Schema des Schlickkreisels sind in Bild 2.3 dargestellt.

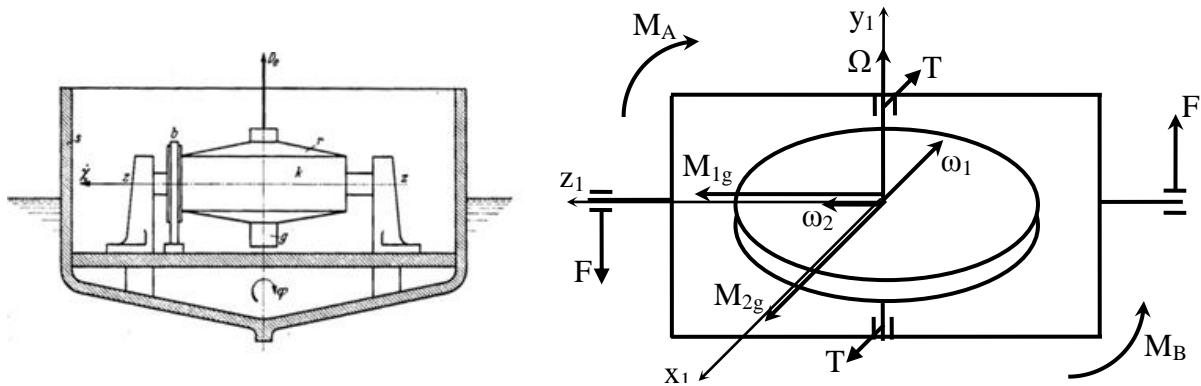


Bild 2.3: Bauschema und kinematisches Schema des Schiffsstabilisators

Die Umdrehungsachse des Kreiselrahmens ist um die Querachse z_1 des Schiffsrumpfs gelagert. Die Drehachse des Kreiselrotors ist im Kreiselrahmen durch die Achse y_1 gelagert. Wenn das Schiff nicht ins Schlingern gerät, dann liegt die Achse y_1 senkrecht. Die Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrotors ist Ω .

Wenn das Kraftmoment M_A durch Schlingern auf das Schiff wirkt, dreht sich das Schiff um seine Längsachse x_1 . Der Winkel φ hat dann eine Winkelgeschwindigkeit von $\omega_1 = \dot{\varphi}$, wobei der Kreiselrahmen sich mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit (wie $\omega_1 = \dot{\varphi}$) um die Achse x_1 dreht. So entwickelt sich das Kreiselmoment M_{1g} , das zur Längsebene des Schiffs koplanar ist. Der Vektor des Moments M_{1g} liegt in der Richtung der z_1 -Achse [76, 78].

Die Winkelgeschwindigkeit des Rotors Ω ist viel höher als die Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrahmens ω . Deswegen ergibt sich durch das elementare Kreiselgesetz [10] folgende Gleichung [76]:

$$\overline{M}_{1g} = I_1 \cdot (\overline{\Omega} \times \overline{\omega}_1), \quad (2.5)$$

I_1 –Drehachsenträgheitsmoment des Kreiselrotors

Die Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrahmens ist gleich:

$$\omega_1 = \dot{\varphi} = \frac{M}{H \sin \beta}. \quad (2.6)$$

$H = I_1 \cdot \Omega$ –Drehimpuls des Kreiselrotors

φ –Drehwinkel des Kreiselrahmens, der in der Ebene x_1z_1 liegt

β –Winkel zwischen den Vektoren $\overline{\Omega}$ und $\overline{\omega}$

Das Kraftmoment M_{1g} entwickelt die Kräfte T , die auf die Lager der Rotorachse einwirken. Unter dieser Krafteinwirkung rotiert die Rotorachse in der Querebene des Schiffs. Aus der Formel (2.5) ist erkennbar, dass die Rotorachse in der Längsebene des Schiffs um die Querachse z_1 und um den Winkel χ rotiert.

Die Winkelgeschwindigkeit der Rotorachse um die Querachse z_1 ist demnach $\omega_2 = \dot{\chi}$. Daraus entwickelt sich das Kreiselmoment $\overline{M}_{g_2} = I_2 \cdot (\overline{\Omega} \times \overline{\omega}_2)$.

Dieses Moment liegt in der Querebene des Schiffs, wobei der Vektor des Moments in der Richtung der x_1 -Achse liegt.

Das Kreiselmoment \overline{M}_{g_2} entwickelt das Kräftepaar F , das auf die Lager des Kreiselrahmens einwirkt. Das Kraftmoment M_B von diesem Kräftepaar wirkt dem Moment M_A entgegen und stabilisiert das Schiff.

Der Roboter hat zwei einaxiale Kreisel. Diese befinden sich im Roboterpendel (Bild 2.1). Wenn die Kreiselrahmen sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω_2 drehen, entwickeln sich zwei Kreiselmomente M_{g_2} , und unter dieser Momentwirkung bewegt sich der Roboter in der Ebene der *Hauptbewegung* S (siehe Bild 2.1).

Wenn die Kreiselrahmen sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω_1 drehen können, entwickelt sich das Kreiselmoment M_{g_1} . Unter dieser Momentwirkung dreht sich die Rollebene S um die X -Achse (siehe Bild 2.1.), und der Roboter ändert seine Bewegungsrichtung.

Durch die Kreiselmomente M_{g_2} kann der Roboter kleine Hindernisse überwinden.

Das Kreiselgerät befindet sich auf der Drehplattform. Diese Plattform ist ein Element des Pendels und kann nicht nur um die x -Achse mit dem Pendel zusammen kippen, sondern auch um die senkrechte y -Achse rotieren.

Das prinzipielle Schema der Kreiselanlage des Roboters ist in Bild 2.4 dargestellt. Die Abstände zwischen der Kreiselrotorachse und dem Massenmittelpunkt des Roboters sind gleich.

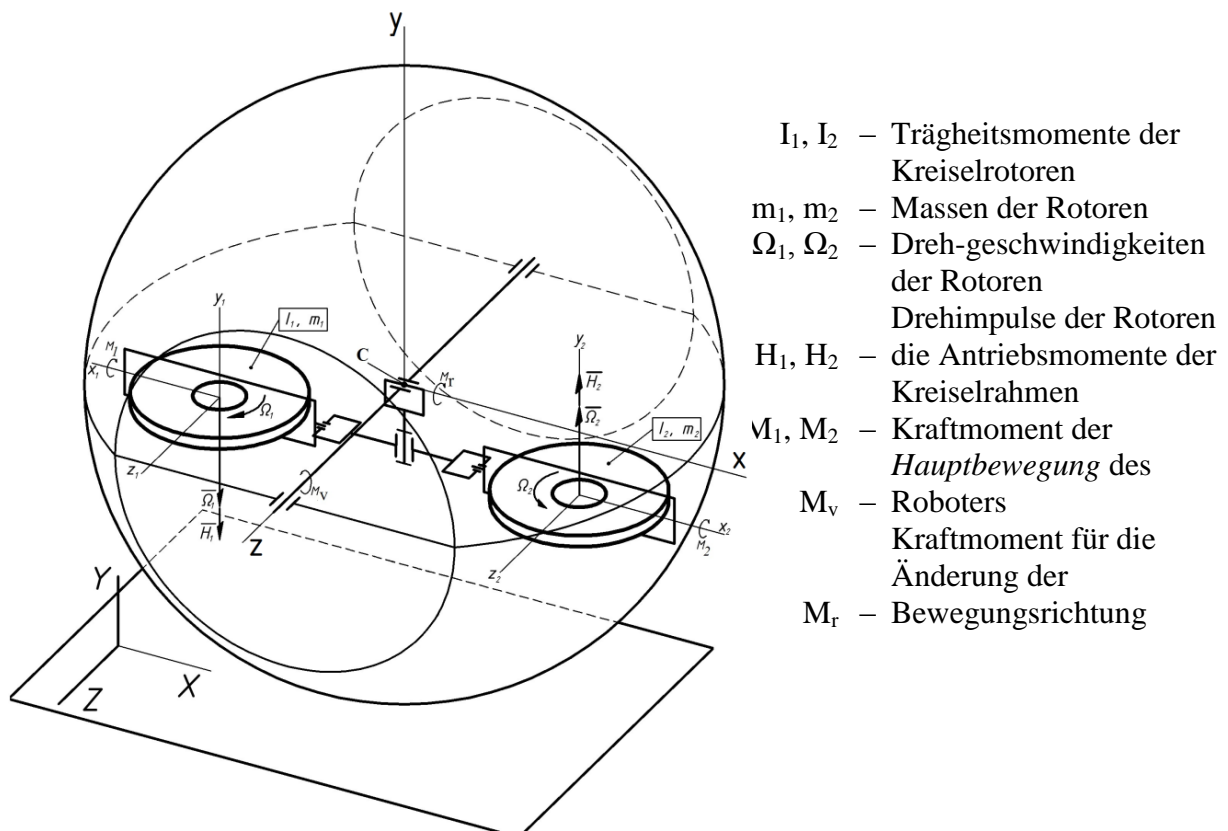
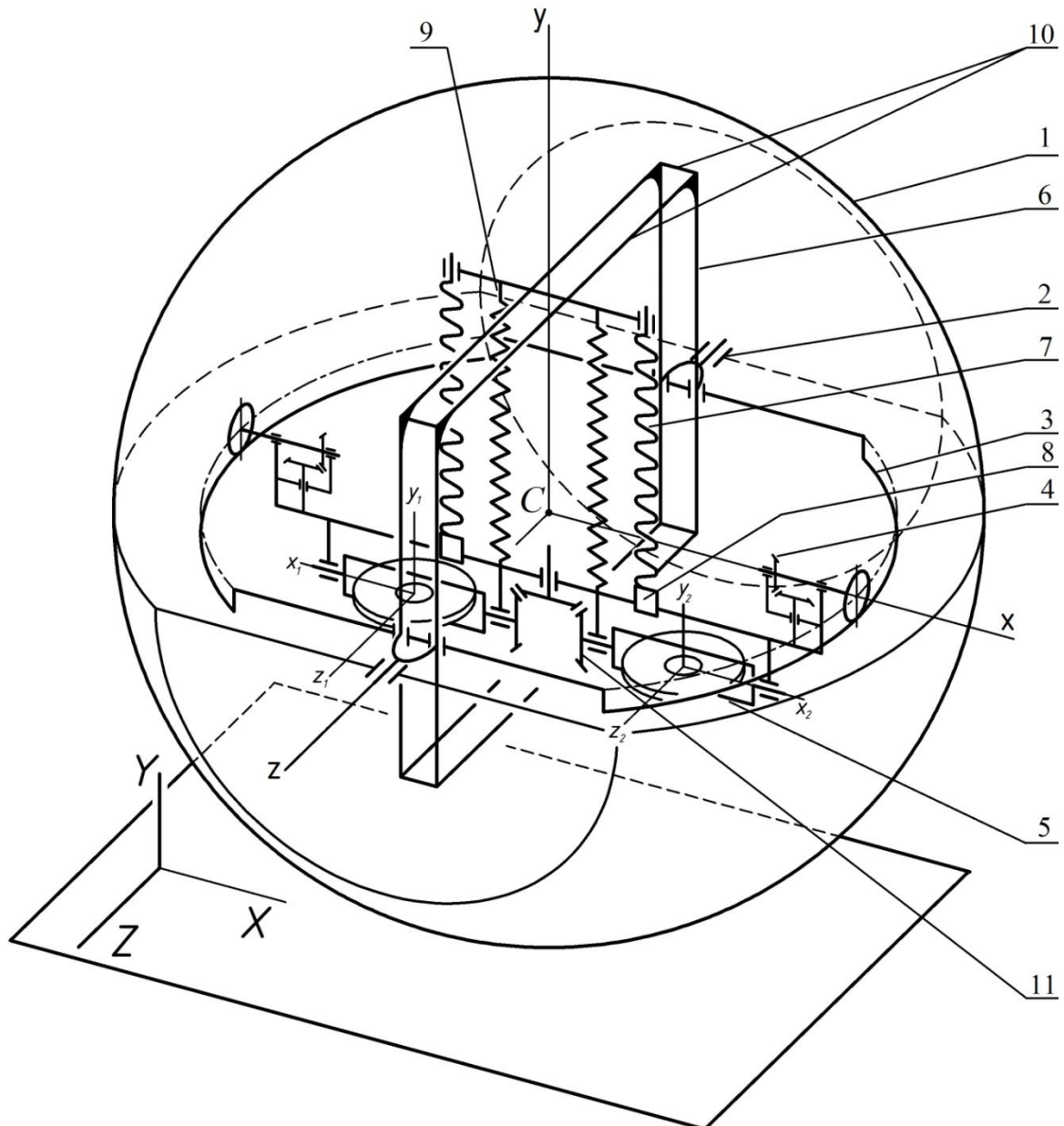


Bild 2.4: Prinzipielles Schema der Kreiselanlage des Roboters

2.4. kinematische Schema des Roboters

Beim Endvergleich des kinematischen Schemas des Roboters muss Folgendes bedacht werden. Die Hauptelemente des Roboters wie der *Sprungmechanismus* und das *Kreiselgerät* müssen innerseitig symmetrisch in der Roboterhüllkugel vorhanden sein. Zudem muss genug Platz für Steuerungselemente (Kontroller, WLAN-Module) und für Akkus gelassen werden.

Deshalb ist das kinematische Schema des Roboters entwickelt worden, das in Bild 2.5 dargestellt ist.



- | | |
|---|---|
| 1 – Hüllkugel | 6 – lineare Führungen des Sprungmechanismus |
| 2 – Gelenk der Achse des Hauptbewegungsantriebs | 7 – Gewindetrieb des Zugmechanismus |
| 3 – äquatoriale Führung | 8 – Feststelleinheit des Zugmechanismus |
| 4 – Antrieb der Pendelabhängung | 9 – Feder des Zugmechanismus |
| 5 – Kreiselrahmen | 10 – Haupttragwerk |
| | 11 – Kegelgetriebe des Antriebs der Kreiselrahmen |

Bild 2.5: Kinematisches Schema des Roboters

In diesem Schema ist die Hüllkugel des Roboters mit zwei beidseitig runden *Seitendeckeln* ausgerüstet. Diese *Seitendeckel* sind mit den Achsen des *Hauptbewegungsantriebs* des Roboters verbunden.

Beide Kreiselrahmen des Kreiselgeräts des Roboters haben einen einzelnen Antrieb. Dieser besteht aus dem Kegelgetriebe und dem Motor, der auf diesem Bild nicht dargestellt ist. Durch das Kegelgetriebe kann der Motor beide Kreiselrahmen drehen. Die Pendelabhängung ist auf Grund der runden äquatorialen Führung konstruiert worden. Bei dieser Bauart ist der Abhängungsmechanismus des Pendels symmetrisch. Somit ist eine Drehplattform (siehe prinzipielles Schema des Roboters in Bild 2.1) als runde Führung realisiert.

2.5. Bewegungsgleichungen des Roboters auf einer gleichmäßig horizontalen Oberfläche

Die Bewegungsgleichungen des Roboters, der in Bild 2.1 dargestellt ist, werden für die weitere Arbeit benötigt. Der Roboter hat eine Symmetrieebene S , deshalb ist folgende Reduzierung möglich. In erster Annäherung ist der Winkel zwischen der S -Ebene und der Vertikalachse y sehr klein ($< 8^\circ$), dadurch ist bekannt, dass der Sinus dieses Winkels ungefähr 1 ist, aber den Wert 1 nicht überschreitet (bspw. für den Winkel 5° ist der Sinus 0,9956). Diese Genauigkeit ist für die Ingenieursberechnungen ausreichend. Dann kann die Roboterbewegung als das Rollen eines flachen dünnen Rads angenommen werden. Das Rad rollt auf der horizontalen Ebene XY und hat ein flaches Pendel, das einen Massenmittelpunkt im Punkt B hat. Der Aufhängungspunkt des Pendels befindet sich im Punkt C , der auch ein Massenmittelpunkt des Rads ist (Bild 2.6).

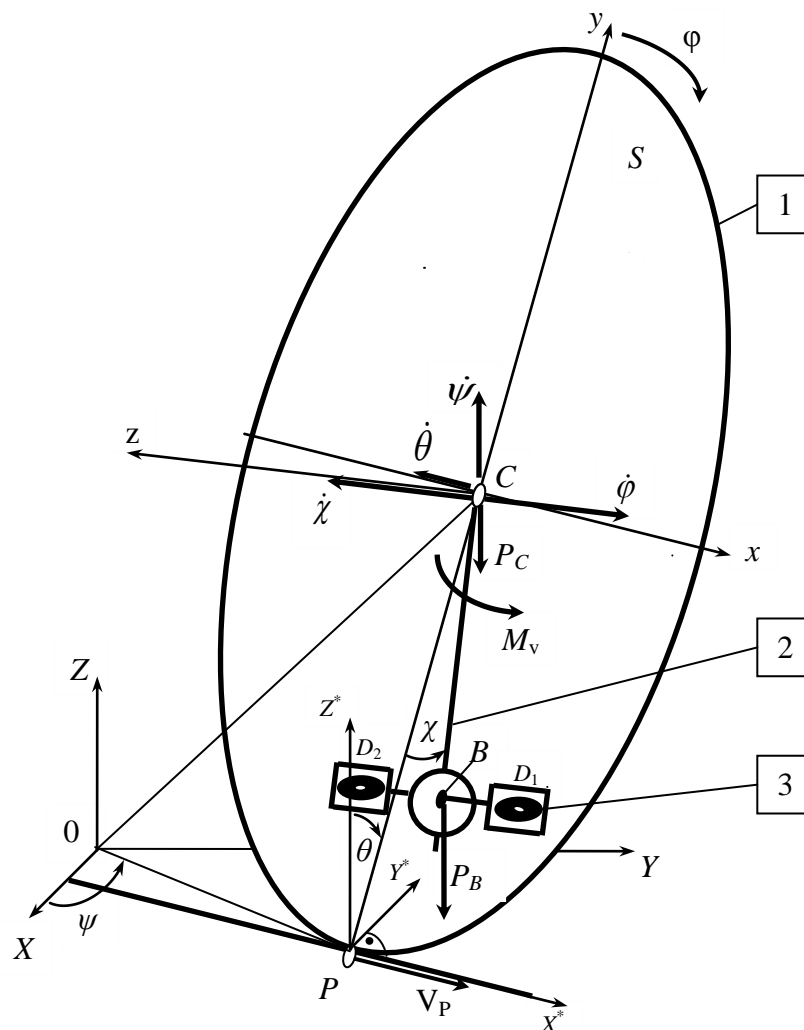


Bild 2.6: Rollen des Rads mit dem flachen Pendel auf der horizontalen Ebene

Für die Darstellung 2.6 sind zwei Koordinatensysteme notwendig, und zwar ein starres OXYZ-Koordinatensystem und ein halbstarres Cxyz- Koordinatensystem. Der Ausgangspunkt des halbstarren Koordinatensystems befindet sich im Punkt C . Die Cz -Achse liegt senkrecht zur xy -Ebene des Rads (Drehachse des Rads); die Cx -Achse liegt parallel zur horizontalen Ebene XY (Achse der Steigung der Radebene); die Cy -Achse leitet sich durch den Kontaktpunkt P ab, der den Punkt beschreibt, in dem sich das Rad und die horizontale Oberfläche XY berühren (Achse der Umlenkung der Radebene). Die Einheitsvektoren der Achsen Cx, Cy, Cz sind als $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ bezeichnet.

Die Grundbausteine des Schemas in Bild 2.5 sind:

1 - dünnes flaches *Rad* (die Scheibe), das eine Masse m_c und einen Radius $R = CP$ hat. Der Massenmittelpunkt des Rads liegt im Punkt C. Die Trägheitsmomente des Rads für die in seiner Ebene liegenden Achsen werden als $J_{cx} = J_{cy} = J_{ca}$ bezeichnet. Das Radträgheitsmoment für die Senkrechte zur Radebene-Achse ist $J_{cz} = J_{cp}$, dabei $J_{cp} = 2J_{ca}$.

Es wird angenommen, dass das Rad nichtschiebend auf der rauen Oberfläche XY rollt. Der Punkt P ist für solche Bewegungen ein Momentangeschwindigkeitspol des Rads.

2 — Das flache *Pendel* hat eine Masse m_b und seinen Massenmittelpunkt im Punkt B. Der Aufhängpunkt des Pendels liegt im Punkt C. Der Abstand zwischen dem Aufhängpunkt und dem Massenmittelpunkt des Pendels ist $CB = b$. Das Trägheitsmoment des Pendels für die Cz-Achse (Drehachse des Rads) ist auch J_{bc} . Bei der Einwirkung des Hauptbewegungsmoments M_v kippt das Pendel und Punkt B verschiebt sich relativ zum Kontaktpunkt P in der Richtung der x-Achse. Dadurch entwickelt sich auf dem Rad ein wirkendes Rollmoment. Wenn der Gleitreibbeiwert f_s für die Ebene XY ausreicht, rollt das Rad nichtschiebend. Dabei gilt es als Rollen, wenn das Rad ein Rollreibungsmoment bewältigen kann. Dieses Rollreibungsmoment entsteht durch die beidseitige Verformung des Rads und der Oberfläche beim Kontakt. Dadurch verschiebt sich die Normalkraft der Oberfläche relativ zum Radmassenmittelpunkt auf den gleichen Abstand, der sich mit dem Rollreibungskoeffizienten f_k deckt.

3 — Das *Kreiselgerät* hat eine Masse m_d . Die Massenmittelpunkte des Kreisels (Punkte D_1 und D_2) und des Pendels (Punkt B) haben jeweils den gleichen Abstand d. Die Trägheitsmomente der Kreisel für die Cz-Achse (Drehachse des Rads) sind J_{dc} . Die Modulgrößen der Drehimpulse der Kreiselrotoren sind gleich. Aber die Vektoren der Drehimpulse liegen jeweils in der Gegenrichtung, wobei die Größen gleich sind:

$$\mathbf{H} = \mathbf{J}_g \cdot \left| \boldsymbol{\Omega}_g \right|.$$

J_g — Trägheitsmoment des Kreiselrotors für die Umdrehungsachse

$\boldsymbol{\Omega}_g$ — Umdrehungsachse des Rotors;

Als generalisierte Koordinaten werden zwei Linearkoordinaten des Massenmittelpunkts des Rads (X_c und Y_c) und vier des Drehwinkels der Radebene verwendet:

φ — Eigenumdrehungswinkel des Rads um die Cz-Achse

ψ — Umlenkungswinkel des Rads (Winkel zwischen der 0X-Achse und der Radtangente im Kontaktpunkt P)

θ — Radneigungswinkel (Winkel zwischen der Senkrechten zur XY-Ebene und der Radebene xy)

χ — Drehwinkel des Pendels (Winkel zwischen dem Radradius CP und der Pendellinie CB) Dieser Winkel bestimmt die Pendelstellung relativ zum Radmassenmittelpunkt C.

Sechs generalisierte Koordinaten werden bezeichnet:

$$q_1 = \theta; \quad q_2 = \psi; \quad q_3 = \varphi; \quad q_4 = \chi; \quad q_5 = X_c; \quad q_6 = Y_c. \quad (2.5)$$

Nach Bild 2.3 sind die Koordinaten der Radmassenmittelpunkte gleich:

$$Z_c = R \cos \theta. \quad (2.6)$$

Für kleine Werte des Radneigungswinkels θ gilt Folgendes:

$$Z_c \approx R = \text{const.}$$

Die zusammengesetzte Bewegung des Roboters im starren Koordinatensystem $OXYZ$ wird in zwei einfache Bewegungen aufgeteilt:

- die Relativbewegung (relativ zum Cxyz-Koordinatensystem)
- die Führungsbewegung Diese Bewegung entsteht bei der Bewegung des Cxyz-Systems im starren Koordinatensystem $OXYZ$.

Nach dem Gesetz der Geschwindigkeitsaddition folgt also, dass die absolute Winkelgeschwindigkeit der Roboter-elemente $\overline{\Omega}^{(a)}$ der Summe der Führungswinkelgeschwindigkeit ($\overline{\Omega}^{(e)}$) und der relativen Winkelgeschwindigkeiten ($\overline{\Omega}^{(r)}$) gleich ist. Dadurch ist die absolute Winkelgeschwindigkeit des Rads gleich:

$$\overline{\Omega}_C^{(a)} = \overline{\Omega}^{(e)}(-\dot{\theta}, \dot{\psi} \cos \theta, \dot{\psi} \sin \theta) + \overline{\Omega}_C^{(r)}(0, 0, -\dot{\varphi}), \quad (2.7)$$

und die absolute Winkelgeschwindigkeit des Pendels mit dem Kreiselgerät ist:

$$\overline{\Omega}_B^{(a)} = \overline{\Omega}^{(e)}(-\dot{\theta}, \dot{\psi} \cos \theta, \dot{\psi} \sin \theta) + \overline{\Omega}_B^{(r)}(0, 0, \dot{\chi}). \quad (2.8)$$

In dieser Formel (und im weiteren Text) ist die vollständige Derivation nach der Zeit mit einem Punkt markiert. Die Vektoren der Geschwindigkeiten in (2.7) und (2.8) sind in Bild 2.6 dargestellt.

Nicht nur der Begriff „Systemstellung“, sondern auch der des „Systemzustands“ werden oft verwendet. Der *Systemzustand* bestimmt sich aus der Masse aller generalisierten Koordinaten und generalisierten Geschwindigkeiten [1].

Für praktische Aufgaben der Gleichungsentwicklung werden oft nicht die generalisierten Koordinaten verwendet, sondern ihre *kinematischen Charakteristika*, die die *linearen Kombinationen* der generalisierten Koordinaten sind. Dieses Verfahren vereinfacht die Entwicklung der Bewegungsgleichungen und verringert zudem den Grad dieser Gleichungen (bspw. nicht 3. Grades, sondern 2. Grades).

Wenn die den *Charakteristika* entsprechenden Gleichungen zeitintegrierbar sind, entsprechen die linearen Kombinationen der generalisierten Koordinaten diesen *Charakteristika*. Wenn die Gleichungen nicht zeitintegrierbar sind, dann entsprechen die *Charakteristika* der generalisierten Koordinaten nicht der Funktion der Systemstellung. Außerdem werden in diesem Fall nicht die generalisierten Koordinaten verwendet, sondern sogenannte Quasikoordinaten und Quasigeschwindigkeiten (diese werden auch Pseudokoordinaten und Pseudogeschwindigkeiten genannt) [2].

Vier Quasikoordinaten werden für den entwickelten Mechanismus gemäß den Formeln (2.7) und (2.8) benötigt. Diese lauten:

p, q, r — Projektionen des Vektors der absoluten Winkelgeschwindigkeit $\overline{\Omega}_C^{(a)}$ des Rads auf die entsprechende Achse des Cxyz-Koordinatensystems

s —Projektion des Vektors der relativen Winkelgeschwindigkeit $\overline{\Omega}_B^{(r)}$ des Pendels auf die Cz-Achse

Bezeichnet werden die Quasikoordinaten durch die Derivationsform. Durch die Formeln (2.7) und (2.8) folgt also:

$$\dot{\pi}_1 = p = -\dot{\theta}; \quad \dot{\pi}_2 = q = \dot{\psi} \cos \theta; \quad \dot{\pi}_3 = r = \dot{\psi} \sin \theta - \dot{\phi}; \quad \dot{\pi}_4 = s = \dot{\chi}. \quad (2.9)$$

Um die Komplexität der Gleichungsentwicklungen zu reduzieren, ist noch ein halbstarres Koordinatensystem $PX^*Y^*Z^*$ notwendig (Bild 2.3). Der Anfangspunkt dieses Koordinatensystems kongruiert mit dem Kontaktpunkt P, der zwischen dem Rad und der Oberfläche liegt. Die Achsen PX^* und PY^* liegen parallel zu den Achsen OX und OY , wenn OX und OY um den Winkel ψ in der Ebene XY gedreht werden.

Für die weitere Entwicklung der Bewegungsgleichungen ist die Formel für die absolute Geschwindigkeit $\overline{V}_C(\dot{X}_c, \dot{Y}_c, \dot{Z}_c)$ des Radmassenmittelpunkts C notwendig. Die Projektionen des Vektors dieser Geschwindigkeit im Koordinatensystem $PX^*Y^*Z^*$ (Bild 2.4, a) sind:

$$\dot{X}_c^* = \dot{X}_c \cos \psi + \dot{Y}_c \sin \psi; \quad \dot{Y}_c^* = -\dot{X}_c \sin \psi + \dot{Y}_c \cos \psi; \quad \dot{Z}_c^* = \dot{Z}_c. \quad (2.10)$$

Wenn die Achsen Cy und Cz des Cxyz-Systems um den Winkel $(90^\circ - \theta)$ in der Ebene Y^*Z^* (Bild 2.7, b) gedreht sind, sind die Projektionen des \overline{V}_C gleich:

$$\dot{x}_c = \dot{X}_c^*; \quad \dot{y}_c = \dot{Y}_c^* \sin \theta + \dot{Z}_c^* \cos \theta; \quad \dot{z}_c = -\dot{Y}_c^* \cos \theta + \dot{Z}_c^* \sin \theta. \quad (2.11)$$

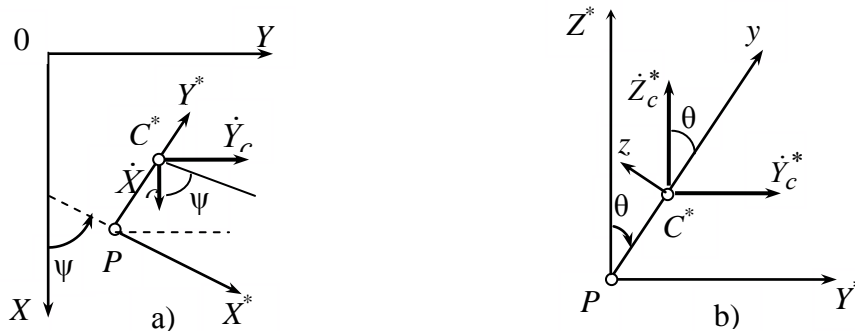


Bild 2.7: Koordinatensysteme und die Projektionen der Vektoren der Geschwindigkeiten des Radmassenmittelpunkts

Gemäß dem Bild 2.7 ist der Radiusvektor des Radmassenmittelpunkts C eine Summe der zwei Radiusvektoren:

$$\overline{OC} = \overline{OP} + \overline{PC} (0, R, 0). \quad (2.12)$$

Durch die Drehung des Cxyz-Koordinatensystems und nach der Anwendung der Regel für das totale Differential des Vektors [2] \overline{PC} ist die absolute Geschwindigkeit des Punkts C gleich:

$$\overline{V}_C^{(a)} = \dot{\overline{OC}} = \dot{\overline{PC}} + \dot{\overline{OP}} = \dot{\overline{PC}} + (\overline{\Omega}^{(e)} \times \overline{PC}) + \overline{V}_P, \quad (2.13)$$

$\overline{\mathbf{V}}_P = \overline{\dot{\mathbf{O}P}}$ —Geschwindigkeit des Punkts P. Punkt P ist ein Pol der Eulerschen Formel, die das Verhältnis zwischen den Punktgeschwindigkeiten des starren Körpers finden lässt

In der Formel (2.13) ist das lokale Zeiterivat durch (*) markiert. Die folgende Gleichung wird für die weitere Arbeit benötigt:

$$\overline{\mathbf{V}}_C^{(a)} = \overline{\mathbf{V}}_C^{(r)} + \overline{\mathbf{V}}_C^{(e)}. \quad (2.14)$$

$\overline{\mathbf{V}}_C^{(r)} = \overline{\dot{\mathbf{P}C}}^*$ —Relativgeschwindigkeit des Punkts C

$\overline{\mathbf{V}}_C^{(e)} = (\overline{\boldsymbol{\Omega}}^{(e)} \times \overline{\mathbf{P}C}) + \overline{\mathbf{V}}_P$ —Translationsgeschwindigkeit des Punkts C

Das vektorielle Produkt der Vektoren $\overline{\mathbf{a}}(a_x, a_y, a_z)$ und $\overline{\mathbf{b}}(b_x, b_y, b_z)$ ist gleich:

$$\overline{\mathbf{c}} = \overline{\mathbf{a}} \times \overline{\mathbf{b}} = \begin{vmatrix} \overline{\mathbf{i}} & \overline{\mathbf{j}} & \overline{\mathbf{k}} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}.$$

Weil der Vektor $\overline{\mathbf{c}}$

$$\overline{\mathbf{c}} = c_x \cdot \overline{\mathbf{i}} + c_y \cdot \overline{\mathbf{j}} + c_z \cdot \overline{\mathbf{k}} \text{ ist,}$$

sind die Elemente c_x, c_y, c_z gleich:

$$c_x = a_y b_z - a_z b_y; \quad c_y = a_z b_x - a_x b_z; \quad c_z = a_x b_y - a_y b_x. \quad (2.15)$$

Die Geschwindigkeit des Momentangeschwindigkeitsspols ist $\overline{\mathbf{V}}_P = 0$, und die relative Geschwindigkeit des Radpunkts C ist:

$$\overline{\mathbf{V}}_C^{(r)} = \overline{\boldsymbol{\Omega}}_C^{(r)} \times \overline{\mathbf{P}C}.$$

Dann folgt durch die Formeln (2.14), (2.7) und (2.9):

$$\overline{\mathbf{V}}_C^{(a)} = (\overline{\boldsymbol{\Omega}}_C^{(r)} + \overline{\boldsymbol{\Omega}}^{(e)}) \times \overline{\mathbf{P}C} = \overline{\boldsymbol{\Omega}}_C^{(a)} \times \overline{\mathbf{P}C} = \begin{vmatrix} \overline{\mathbf{i}} & \overline{\mathbf{j}} & \overline{\mathbf{k}} \\ p & q & r \\ 0 & R & 0 \end{vmatrix}. \quad (2.16)$$

Durch die Formeln (2.15) und (2.16) sind die Projektionen des Vektors der Geschwindigkeit $\overline{\mathbf{V}}_C^{(a)}$ im Cxyz-Koordinatensystem gleich:

$$\dot{x}_c = -Rr; \quad \dot{y}_c = 0; \quad \dot{z}_c = Rp. \quad (2.17)$$

Nach dem Einsetzen der Formeln (2.17) in die Gleichungen (2.11) ergeben sich drei Gleichungen der kinematischen Verbindungen, die auf die Geschwindigkeit des Radmassenmittelpunkts C wirken:

$$\dot{\mathbf{X}}_c^* = -Rr; \quad \dot{\mathbf{Y}}_c^* \sin \theta + \dot{\mathbf{Z}}_c^* \cos \theta = 0; \quad -\dot{\mathbf{Y}}_c^* \cos \theta + \dot{\mathbf{Z}}_c^* \sin \theta = Rp.$$

Diese drei Gleichungen können mit den Formeln (2.10) und (2.9) in folgende Form gebracht werden:

$$\mathbf{u} = \dot{\mathbf{X}}_c^* + \mathbf{R} \mathbf{r} = \dot{\mathbf{X}}_c \cos \psi + \dot{\mathbf{Y}}_c \sin \psi + \mathbf{R} (\dot{\psi} \sin \theta - \dot{\phi}) = 0; \quad (2.18)$$

$$\mathbf{v} = \dot{\mathbf{Y}}_c^* + \mathbf{R} \mathbf{p} \cos \theta = -\dot{\mathbf{X}}_c \sin \psi + \dot{\mathbf{Y}}_c \cos \psi - \mathbf{R} \dot{\theta} \cos \theta = 0; \quad (2.19)$$

$$\mathbf{w} = \dot{\mathbf{Z}}_c^* - \mathbf{R} \mathbf{p} \sin \theta = \dot{\mathbf{Z}}_c + \mathbf{R} \dot{\theta} \sin \theta = 0. \quad (2.20)$$

Die kinematischen Charakteristika \mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{w} des Mechanismus werden als die Quasigeschwindigkeiten verwendet.

Das Integrieren der Formel (2.20) ergibt das Verhältnis (2.6), das die Gleichung der geometrischen Verbindung ist. Aber die Gleichungen (2.18) und (2.19) sind im allgemeinen Fall nicht integrierbar (wenn der Umlenkungswinkel Ψ nicht konstant ist). Ähnliche Verbindungen und mechanische Systeme nennen sich *nicht holonom*.

Der Roboter hat sechs generalisierte Koordinaten, zwei *nicht holonome* Verbindungen und vier Freiheitsgrade. Deswegen wird die Bewegung des Roboters mit vier Differentialgleichungen beschrieben. Für die Reduzierung der weiteren mathematischen Transformationen werden zwei Quasigeschwindigkeiten (2.18) und (2.19) mit den vier Quasigeschwindigkeiten (2.9) nach dem Verfahren aus [1] verwendet. Die Quasigeschwindigkeiten (2.18) und (2.19) werden als

$$\dot{\pi}_5 = \mathbf{u} = \dot{\mathbf{X}}_c^* + \mathbf{R} \mathbf{r} = 0; \quad \dot{\pi}_6 = \mathbf{v} = \dot{\mathbf{Y}}_c^* + \mathbf{R} \mathbf{p} \cos \theta = 0 \quad (2.21)$$

bezeichnet.

Dann sind die Projektionen der Absolutgeschwindigkeit des Punkts C für das $PX^*Y^*Z^*$ -Koordinatensystem:

$$\dot{\mathbf{X}}_c^* = -\mathbf{R} \mathbf{r} + \mathbf{u}; \quad \dot{\mathbf{Y}}_c^* = -\mathbf{R} \mathbf{p} \cos \theta + \mathbf{v}; \quad \dot{\mathbf{Z}}_c^* = \mathbf{R} \mathbf{p} \sin \theta,$$

und für das Cxyz-Koordinatensystem sind diese Projektionen laut den Formeln (2.11):

$$\dot{x}_c = -\mathbf{R} \mathbf{r} + \mathbf{u}; \quad \dot{y}_c = \mathbf{v} \sin \theta; \quad \dot{z}_c = \mathbf{R} \mathbf{p} - \mathbf{v} \cos \theta. \quad (2.22)$$

Laut den Formeln (2.22) ist die quadrierte Absolutgeschwindigkeit des Punkts C gleich:

$$\begin{aligned} V_C^2 &= \dot{\mathbf{X}}_c^2 + \dot{\mathbf{Y}}_c^2 + \dot{\mathbf{Z}}_c^2 = \dot{\mathbf{X}}_c^{*2} + \dot{\mathbf{Y}}_c^{*2} + \dot{\mathbf{Z}}_c^{*2} = \\ &= \dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2 = (-\mathbf{R} \mathbf{r} + \mathbf{u})^2 + (\mathbf{v} \sin \theta)^2 + (\mathbf{R} \mathbf{p} - \mathbf{v} \cos \theta)^2 = \\ &= \mathbf{R}^2 \cdot (\mathbf{r}^2 + \mathbf{p}^2) - 2\mathbf{R} \cdot (\mathbf{r} \mathbf{u} + \mathbf{p} \mathbf{v} \cos \theta) + (\mathbf{u}^2 + \mathbf{v}^2). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Wenn der Momentangeschwindigkeitspol im Punkt C liegt, ist die Geschwindigkeit des Pendelmassenmittelpunkts B durch die Eulersche Formel und laut der Gleichung (2.16):

$$\bar{\mathbf{V}}_B = \bar{\mathbf{V}}_C^{(a)} + \bar{\mathbf{V}}_{BC} = \bar{\mathbf{V}}_C^{(a)} + (\bar{\boldsymbol{\Omega}}_B^{(r)} \times \bar{\mathbf{BC}}) = \bar{\mathbf{V}}_C^{(a)} + \begin{vmatrix} \bar{\mathbf{i}} & \bar{\mathbf{j}} & \bar{\mathbf{k}} \\ 0 & 0 & s \\ b \sin \chi & -b \cos \chi & 0 \end{vmatrix}.$$

Die Projektionen des Vektors sind in Bild 2.5 dargestellt. Der Vektor der relativen Geschwindigkeit $\bar{\mathbf{V}}_{BC}$ ist zur BC-Strecke senkrecht und $V_{BC} = bs$. Daraus folgt:

$$\mathbf{V}_{Bx} = \dot{x}_c + bs \cdot \cos \chi; \quad \mathbf{V}_{By} = \dot{y}_c + bs \cdot \sin \chi; \quad \mathbf{V}_{Bz} = \dot{z}_c. \quad (2.24)$$

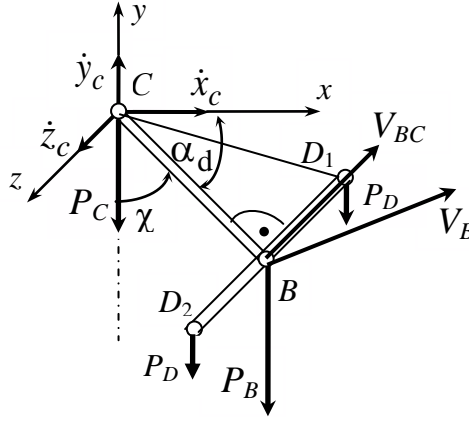


Bild 2.8: Vektoren der Geschwindigkeiten der Massenmittelpunkte des Rads und des Pendels
Laut den Formeln (2.24) ist die quadrierte Absolutgeschwindigkeit der Massenmittelpunkte des Pendels:

$$\begin{aligned} V_B^2 &= V_{Bx}^2 + V_{By}^2 + V_{Bz}^2 = \\ &= \dot{x}_C^2 + \dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2 + b^2 s^2 + 2bs (\dot{x}_C \cos \chi + \dot{y}_C \sin \chi) \end{aligned}$$

oder laut den Formeln (2.22):

$$\begin{aligned} V_B^2 &= R^2 \cdot (r^2 + p^2) - 2R \cdot (ru + pv \cos \theta) + (u^2 + v^2) + \\ &+ b^2 s^2 + 2bs [(-Rr + u) \cos \chi + v \sin \theta \sin \chi] . \end{aligned} \quad (2.25)$$

Zudem ist die quadrierte Absolutgeschwindigkeit der Massenmittelpunkte des Kreisels D_1 und D_2 :

$$\begin{aligned} V_D^2 &= R^2 \cdot (r^2 + p^2) - 2R \cdot (ru + pv \cos \theta) + (u^2 + v^2) + \\ &+ r_d^2 s^2 + 2r_d s [(-Rr + u) \cos(\alpha_d + \chi) + v \sin \theta \sin(\alpha_d + \chi)] , \end{aligned} \quad (2.26)$$

bei denen $r_d^2 = d^2 + b^2$ und $\alpha_d = \arctg \frac{d}{b}$ sind. d ist der Abstand zwischen dem Punkt B und dem jeweiligen Massenmittelpunkt der Kreiselrotoren.

Die kinetische Energie des Mechanismus ist die Summe der kinetischen Energien aller seiner Elemente:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 . \quad (2.27)$$

Die Formeln für diese Energien werden durch den 2. Satz von König erschlossen. Die kinetische Energie des Systems ist laut diesem Satz die Summe zweier Terme:

- die kinetische Energie des Schwerpunktes G , ausgestattet mit der Gesamtmasse M (des Systems)
- die innere kinetische Energie des Systems, die die Energie der Drehbewegung um die Massenmittelpunktachse ist (für den entwickelten Mechanismus)

Laut der Formel (2.23) ist die kinetische Energie der Translationsbewegung des Rads:

$$T_{1C} = \frac{1}{2} m_C V_C^2 = \frac{m_1}{2} [R^2 \cdot (r^2 + p^2) - 2R \cdot (ru + pv \cos \theta) + (u^2 + v^2)].$$

Die kinetische Energie der Raddrehung ist:

$$T_{1\Omega} = \frac{1}{2} \sum_v m_v V_v^2. \quad (2.28)$$

V_v ist die Geschwindigkeit des v -ten Punkts, der die Masse m_v und den Radiusvektor $\bar{r}_v(x_v, y_v, z_v)$ im Cxyz-Koordinatensystem hat. Der Vektor dieser Geschwindigkeit ist laut der Formel (2.16):

$$\bar{V}_v = \bar{\Omega}_C^{(a)} \times \bar{r}_v = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ p & q & r \\ x_v & y_v & z_v \end{vmatrix}.$$

Durch die Gleichungen (2.15) sind die Projektionen des Geschwindigkeitsvektors des v -ten Punkts:

$$V_{vx} = qz_v - ry_v; \quad V_{vy} = rx_v - pz_v; \quad V_{vz} = py_v - qx_v.$$

Die quadrierte Geschwindigkeit ist:

$$V_v^2 = V_{vx}^2 + V_{vy}^2 + V_{vz}^2 = (y_v^2 + z_v^2)p^2 + (z_v^2 + x_v^2)q^2 + (x_v^2 + y_v^2)r^2 - 2z_v y_v q r - 2x_v z_v r p - 2y_v x_v p q. \quad (2.29)$$

Die Trägheitsmomente des Rads für die Achsen des Cxzy-Koordinatensystems sind:

$$J_{cx} = \sum_v m_v (y_v^2 + z_v^2); \quad J_{cy} = \sum_v m_v (z_v^2 + x_v^2); \quad J_{cz} = \sum_v m_v (x_v^2 + y_v^2). \quad (2.30)$$

Die Achsen Cx, Cy und Cz sind die Symmetrieachsen des Rads, dadurch sind die Deviationsmomente für diese Achsen gleich Null:

$$J_{cyz} = \sum_v m_v y_v z_v = 0; \quad J_{czx} = \sum_v m_v z_v x_v = 0; \quad J_{cxy} = \sum_v m_v x_v y_v = 0. \quad (2.31)$$

Nach der Permutation der Formel (2.29) in der Gleichung (2.28) folgt:

$$T_{1\Omega} = \frac{J_{cx}}{2} \cdot p^2 + \frac{J_{cy}}{2} \cdot q^2 + \frac{J_{cz}}{2} \cdot r^2.$$

Die kinetische Energie des Rads ist:

$$T_1 = T_{1C} + T_{1\Omega} = \frac{m_c}{2} [R^2 \cdot (r^2 + p^2) - 2R \cdot (ru + pv \cos \theta) + (u^2 + v^2)] + \frac{J_{ca}}{2} \cdot (p^2 + q^2) + \frac{J_{cp}}{2} \cdot r^2, \quad (2.32)$$

bei denen $J_{ca} = J_{cx} = J_{cy}$ und $J_{cp} = J_{cz}$ sind.

Laut der Formel (2.25) ist die kinetische Energie des Pendels:

$$T_{2B} = \frac{m_b}{2} \{ R^2 \cdot (r^2 + p^2) - 2R \cdot (ru + pv \cos \theta) + (u^2 + v^2) + b^2 s^2 + 2bs[(-Rr + u) \cos \chi + v \sin \theta \sin \chi] \} .$$

Die kinetische Energie der Drehbewegung des Pendels um die Cz-Achse mit der Winkelgeschwindigkeit S ist:

$$T_{3\Omega} = \frac{J_{bc}}{2} \cdot s^2 .$$

Dann ist die kinetische Energie des Pendels:

$$T_2 = T_{2B} + T_{2\Omega} = \frac{m_b}{2} \{ R^2 \cdot (r^2 + p^2) - 2R \cdot (ru + pv \cos \theta) + (u^2 + v^2) + b^2 s^2 + 2bs[(-Rr + u) \cos \chi + v \sin \theta \sin \chi] \} + \frac{J_{bc}}{2} \cdot s^2 . \quad (2.33)$$

Laut der Formel (2.26) ist die kinetische Energie der Translationsbewegung des Kreisels:

$$T_{3D} = \frac{m_d}{2} \{ R^2 \cdot (r^2 + p^2) - 2R \cdot (ru + pv \cos \theta) + (u^2 + v^2) + r_d^2 s^2 + 2r_d s[(-Rr + u) \cos(\alpha_d + \chi) + v \sin \theta \sin(\alpha_d + \chi)] \} .$$

Die kinetische Energie der Drehbewegungen des Rotors um die Rotordrehachse und um die Cz-Achse:

$$T_{3\Omega} = \frac{J_{dc}}{2} \cdot s^2 + \frac{J_g}{2} \cdot \Omega_g^2 .$$

Die kinetische Energie des Kreiselgeräts mit den zwei Rotoren ist:

$$T_3 = 2T_{3D} + 2T_{3\Omega} = m_d \{ R^2 \cdot (r^2 + p^2) - 2R \cdot (ru + pv \cos \theta) + (u^2 + v^2) + r_d^2 s^2 + 2r_d s[(-Rr + u) \cos(\alpha_d + \chi) + v \sin \theta \sin(\alpha_d + \chi)] + J_{dc} s^2 + J_g \Omega_g^2 \} . \quad (2.34)$$

Die kinetische Energie des Mechanismus nach den Umgestaltungen ist:

$$\begin{aligned} T &= T_1 + T_2 + T_3 = \\ &= \frac{m_w}{2} [R^2 \cdot (r^2 + p^2) - 2R \cdot (ru + pv \cos \theta) + (u^2 + v^2)] + \\ &\quad + \frac{m_b}{2} \{ b^2 s^2 + 2bs[(-Rr + u) \cos \chi + v \sin \theta \sin \chi] \} + \\ &\quad + m_d \{ r_d^2 s^2 + 2r_d s[(-Rr + u) \cos(\alpha_d + \chi) + v \sin \theta \sin(\alpha_d + \chi)] \} + \\ &\quad + \frac{J_{ca}}{2} \cdot (p^2 + q^2) + \frac{J_{cp}}{2} \cdot r^2 + \frac{J_w}{2} \cdot s^2 + J_g \Omega_g^2 , \end{aligned} \quad (2.35)$$

wobei $m_w = m_c + m_b + 2m_d$; $J_w = J_{bc} + 2J_{dc}$ sind.

Die Gewichte der Elemente des Mechanismus (Bild 2.5) sind:

$$P_C = m_c g \text{ — Gewicht des Rades}$$

$$P_B = m_b g \text{ — Gewichts des Pendels}$$

$$P_D = m_d g \text{ — Gewichte der Kreiselgeräte}$$

Die zu diesen Kräften bestätigte *Funktion* ist die Summe der potentiellen Energien aller Elemente des Mechanismus, die auf (-1) multipliziert sind laut dem Verfahren aus der [3]:

$$\begin{aligned} U(\theta, \chi) &= (m_b + 2m_d)g \cdot [R(1 - \cos\theta) + b\cos\chi \cdot \cos\theta] + m_c g \cdot R(1 - \cos\theta) = \\ &= (m_b + 2m_d)g b\cos\chi \cdot \cos\theta + m_w g(1 - \cos\theta), \end{aligned} \quad (2.36)$$

Die Elementararbeit des auf das Rad wirkenden Kraftmoments M_v ist:

$$\delta A_{M_v} = M_v \cdot (\delta\varphi + \delta\chi).$$

Die Elementararbeit des Kraftmoments der Rollreibung M_k ist:

$$\delta A_{M_k} = -M_k \cdot \delta\varphi = -f_k \cdot m_w g \cos\theta \cdot \delta\varphi.$$

Die Elementararbeit der generalisierten Kräfte Q_j für die entsprechenden generalisierten Verschiebungen q_j ist:

$$\delta A = \sum_{j=1}^6 Q_j \cdot \delta q_j = \delta A_{M_v} + \delta A_{M_k}.$$

Dann sind die generalisierten Kräfte, die den generalisierten Koordinaten (2.5) entsprechen, gleich:

$$Q_1 = 0; Q_2 = 0; Q_3 = M_v - f_k \cdot m_w g \cos\theta; Q_4 = M_v; Q_5 = 0; Q_6 = 0. \quad (2.37)$$

Um die Bewegungsgleichungen zu erschließen, werden die Lagrange-Euler-Gleichungen mit den Quasikoordinaten verwendet. Diese Gleichungen sind den Lagrange-Gleichungen ähnlich und können für holonome und nicht holonome mechanische Systeme verwendet werden [1].

Die Matrizenform der Quasigeschwindigkeiten (2.9), (2.18) und (2.19) sind:

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \\ s \\ u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\theta & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 \sin\theta & -R_1 & 0 & \cos\psi & \sin\psi \\ -R_1 \cos\theta & 0 & 0 & 0 & -\sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\chi} \\ \dot{X}_c \\ \dot{Y}_c \end{pmatrix},$$

Dann sind die Komponenten des Vektors der Quasigeschwindigkeiten:

$$\dot{\pi}_i = \frac{d\pi_i}{dt} = \sum_{j=1}^6 \alpha_{ij} \frac{dq_j}{dt} = \sum_{j=1}^6 \alpha_{ij} \dot{q}_j \quad (i = 1, \dots, 6). \quad (2.38)$$

α_{ij} –Elemente der Matrix, die die Vektoren der Quasigeschwindigkeiten und der generalisierten Geschwindigkeiten verbindet

Die Determinante der Matrix $\|\alpha_{ij}\|$ ist ungleich Null, und die inverse Matrix ist:

$\|\beta_{jk}\|^{-1} = \|\alpha_{ij}\|$. Daraus folgt:

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\chi} \\ \dot{X}_c \\ \dot{Y}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sec\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \operatorname{tg}\theta & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ R_1 \cos\theta \sin\psi & 0 & -R_1 \cos\psi & 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ -R_1 \cos\theta \cos\psi & 0 & -R_1 \sin\psi & 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \\ s \\ u \\ v \end{pmatrix}.$$

Dann sind die Komponenten des Vektors der generalisierten Geschwindigkeiten:

$$\dot{q}_j = \frac{dq_j}{dt} = \sum_{k=1}^6 \beta_{jk} \frac{d\pi_k}{dt} = \sum_{k=1}^6 \beta_{jk} \dot{\pi}_k \quad (j=1, \dots, 6), \quad (2.39)$$

Entsprechend den Formeln (2.38) und (2.39) sind die Derivationen und die Variationen der Quasikoordinaten und der generalisierten Koordinaten:

$$d\pi_i = \sum_{j=1}^6 \alpha_{ij} dq_j; \quad \delta\pi_i = \sum_{j=1}^6 \alpha_{ij} \delta q_j \quad (i=1, \dots, 6); \quad (2.40)$$

$$dq_j = \sum_{k=1}^6 \beta_{jk} d\pi_k; \quad \delta q_j = \sum_{k=1}^6 \beta_{jk} \delta\pi_k \quad (j=1, \dots, 6). \quad (2.41)$$

Gemäß der [1] und laut den Formeln (2.41) folgt:

$$\frac{\partial q_j}{\partial \pi_k} = \frac{\partial \dot{q}_j}{\partial \dot{\pi}_k} = \beta_{jk}.$$

Dann ist die Differenzierung nach den Quasikoordinaten für jede f-Funktion von den generalisierten Koordinaten nach folgender Formel möglich:

$$\frac{\partial f}{\partial \pi_k} = \sum_{j=1}^6 \frac{\partial f}{\partial q_j} \cdot \frac{\partial q_j}{\partial \pi_k} = \sum_{j=1}^6 \beta_{jk} \cdot \frac{\partial f}{\partial q_j}. \quad (2.42)$$

Das Gesetz der Permutationen der Differenzierung und der Variabilität kann für die generalisierten Koordinaten verwendet werden. Daraus lässt sich folgende Gleichung ableiten:

$$d(\delta q_j) - \delta(dq_j) = 0 \quad (j=1, \dots, 6), \quad (2.43)$$

und für die Quasikoordinaten sind die sogenannten „Permutationsverhältnisse“ aus der [1] möglich:

$$d(\delta \pi_j) - \delta(d\pi_j) = \sum_{i,k=1}^6 \gamma_{ik}^{(j)} d\pi_k \delta\pi_i \quad (j=1, \dots, 6). \quad (2.44)$$

$\gamma_{ik}^{(j)}$ — die Boltzmann-Koeffizienten sind:

$$\gamma_{ik}^{(j)} = \sum_{s,r=1}^6 \beta_{si} \beta_{rk} \cdot \left(\frac{\delta \alpha_{js}}{\delta q_r} - \frac{\delta \alpha_{jr}}{\delta q_s} \right). \quad (2.45)$$

Diese Koeffizienten hängen von den Elementen des Vektors der Quasigeschwindigkeiten (2.38) und des Vektors der generalisierten Koordinaten (2.39) ab.

Laut den Formeln (2.44) ist die nächste Gleichung:

$$\sum_{i,k=1}^6 \gamma_{ik}^{(j)} d\pi_k d\pi_i = 0, \quad (2.46)$$

und durch die Formel (2.45) folgt:

$$\gamma_{ii}^{(j)} = 0; \quad \gamma_{ik}^{(j)} = -\gamma_{ki}^{(j)}. \quad (2.47)$$

Dann werden die Matrizen $\left\| \gamma_{ik}^{(j)} \right\|$ schiefsymmetrisch.

Für den entwickelten Mechanismus mit den vier Freiheitsgraden werden die differentialen Lagrange-Euler-Gleichungen mit den Quasikoordinaten folgende Form haben [1]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_i} \right) - \frac{\partial (T+U)}{\partial \pi_i} + \sum_{k=1}^6 \dot{\pi}_k \left(\sum_{j=1}^6 \gamma_{ik}^{(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_j} \right) = \Pi_i \quad (i = 1,2,3,4). \quad (2.48)$$

Π_i —quasigeneralisierte Kräfte, die laut den Formeln (2.41) aus den folgenden Gleichungen für die Elementararbeit erschlossen werden können:

$$\delta A = \sum_{j=1}^6 Q_j \cdot \delta q_j = \sum_{j,i=1}^6 Q_j \beta_{ji} \delta \pi_i = \sum_{i=1}^6 \Pi_i \delta \pi_i.$$

Dann sind die quasigeneralisierte Kräfte (die den Quasikoordinaten π_i entsprechen):

$$\Pi_i = \sum_{j=1}^6 \beta_{ji} \cdot Q_j.$$

Laut der Formel (2.42) folgt:

$$\frac{\partial (T+U)}{\partial \pi_i} = \sum_{j=1}^6 \beta_{ji} \cdot \frac{\partial (T+U)}{\partial q_j},$$

und durch (2.21) sind die folgenden Quasigeschwindigkeiten $\dot{\pi}_5 = 0$; $\dot{\pi}_6 = 0$.

Daraus folgt aus den Formeln (2.38) und (2.39) mit Hilfe der Gleichungen (2.44)-(2.47):

$$d(\delta \pi_1) - \delta(d \pi_1) = 0;$$

$$d(\delta \pi_2) - \delta(d \pi_2) = -\operatorname{tg} \theta \cdot (d\pi_2 \delta \pi_1 - d\pi_1 \delta \pi_2);$$

$$d(\delta \pi_3) - \delta(d \pi_3) = (d\pi_2 \delta \pi_1 - d\pi_1 \delta \pi_2);$$

$$d(\delta \pi_4) - \delta(d \pi_4) = 0;$$

$$d(\delta \pi_5) - \delta(d \pi_5) = \operatorname{sec} \theta \cdot (d\pi_2 \delta \pi_6 - d\pi_6 \delta \pi_2);$$

$$d(\delta\pi_6) - \delta(d\pi_6) = R \sec\theta \cdot (d\pi_2 \delta\pi_3 - d\pi_3 \delta\pi_2) - \\ - \sec\theta \cdot (d\pi_2 \delta\pi_5 - d\pi_5 \delta\pi_2) .$$

Dann sind die Boltzmann-Koeffizienten:

$$\gamma_{12}^{(2)} = -\gamma_{21}^{(2)} = -\operatorname{tg}\theta ; \quad \gamma_{12}^{(3)} = -\gamma_{21}^{(3)} = 1 ; \\ \gamma_{26}^{(5)} = -\gamma_{62}^{(5)} = -\sec\theta ; \quad \gamma_{23}^{(6)} = -\gamma_{32}^{(6)} = -R \sec\theta ; \quad \gamma_{25}^{(6)} = -\gamma_{52}^{(6)} = \sec\theta . \quad (2.49)$$

Andere Koeffizienten $\gamma_{ik}^{(j)}$ sind gleich Null.

Die Derivationen der Gleichung (2.35) nach den Quasigeschwindigkeiten sind:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_1} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{p}} = (\mathbf{m}_w R^2 + \mathbf{J}_{ca}) \cdot \mathbf{p} ; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_2} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{J}_{ca} \cdot \mathbf{q} ; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_3} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{r}} = (\mathbf{m}_w R^2 + \mathbf{J}_{cp}) \cdot \mathbf{r} - [\mathbf{m}_b \mathbf{b} \cdot \cos\chi + 2\mathbf{m}_d r_d \cdot \cos(\alpha_d + \chi)] R \cdot \mathbf{s} ; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_4} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{s}} = (\mathbf{m}_b \mathbf{b}^2 + 2\mathbf{m}_d r_d^2 + \mathbf{J}_w) \cdot \mathbf{s} - [\mathbf{m}_b \mathbf{b} \cdot \cos\chi + 2\mathbf{m}_d d \cdot \cos(\alpha_d + \chi)] R \cdot \mathbf{r} ; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_5} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{u}} = -\mathbf{m}_w R \cdot \mathbf{r} + [\mathbf{m}_b \mathbf{b} \cdot \cos\chi + 2\mathbf{m}_d r_d \cdot \cos(\alpha_d + \chi)] \cdot \mathbf{s} ; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_6} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{v}} = -\mathbf{m}_w R \cdot \mathbf{p} \cos\theta + [\mathbf{m}_b \mathbf{b} \cdot \sin\chi + 2\mathbf{m}_d r_d \cdot \sin(\alpha_d + \chi)] \cdot \mathbf{s} \sin\theta .$$

Bei der Differenzierung ist die folgende Bedingung zu berücksichtigen gewesen: laut den Gleichungen (2.21) sind $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ und $\mathbf{v} = \mathbf{0}$.

Die Summen der Quasikoordinaten, die in den Bewegungsgleichungen verwendet werden, sind:

$$\sum_{k=1}^6 \dot{\pi}_k \left(\sum_{j=1}^6 \gamma_{1k}^{(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_j} \right) = \dot{\pi}_2 \cdot \left(\gamma_{12}^{(2)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_2} + \gamma_{12}^{(3)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_3} \right) = \\ = \mathbf{q} \cdot [-\operatorname{tg}\theta \cdot \mathbf{J}_{ca} \mathbf{q} + (\mathbf{m}_w R^2 + \mathbf{J}_{cp}) \cdot \mathbf{r} - (\mathbf{m}_b \mathbf{b} \cdot \cos\chi + 2\mathbf{m}_d r_d \cdot \cos(\alpha_d + \chi))] R \cdot \mathbf{s}] \\ ; \\ \sum_{k=1}^6 \dot{\pi}_k \left(\sum_{j=1}^6 \gamma_{2k}^{(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_j} \right) = \dot{\pi}_1 \cdot \left(\gamma_{21}^{(2)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_2} + \gamma_{21}^{(3)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_3} \right) + \dot{\pi}_3 \cdot \left(\gamma_{23}^{(6)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_6} \right) = \\ = \mathbf{p} \cdot [\operatorname{tg}\theta \cdot \mathbf{J}_{ca} \mathbf{q} - (\mathbf{m}_w R^2 + \mathbf{J}_{cp}) \cdot \mathbf{r} + (\mathbf{m}_b \mathbf{b} \cdot \cos\chi + 2\mathbf{m}_d r_d \cdot \cos(\alpha_d + \chi))] R \cdot \mathbf{s}] + \\ + \mathbf{r} \cdot R \sec\theta \cdot [\mathbf{m}_w R \cdot \mathbf{p} \cos\theta - [\mathbf{m}_b \mathbf{b} \cdot \sin\chi + 2\mathbf{m}_d r_d \cdot \sin(\alpha_d + \chi)] \cdot \mathbf{s} \sin\theta] ; \\ \sum_{k=1}^6 \dot{\pi}_k \left(\sum_{j=1}^6 \gamma_{3k}^{(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_j} \right) = \dot{\pi}_2 \cdot \left(\gamma_{32}^{(6)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_6} \right) =$$

$$= -q \cdot R \sec \theta \cdot [m_w R \cdot p \cos \theta - [m_b b \cdot \sin \chi + 2m_d r_d \cdot \sin(\alpha_d + \chi)] \cdot s \sin \theta] ;$$

$$\sum_{k=1}^6 \dot{\pi}_k \left(\sum_{j=1}^6 \gamma_{4k}^{(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_j} \right) = 0 .$$

Die Derivationen der Funktion $(T + U)$ nach den Quasikoordinaten:

$$\frac{\partial(T + U)}{\partial \pi_1} = \beta_{11} \cdot \frac{\partial U}{\partial \theta} = -(m_w g R - m_b g b \cdot \cos \chi) \cdot \sin \theta ;$$

$$\frac{\partial(T + U)}{\partial \pi_2} = 0 ; \quad \frac{\partial(T + U)}{\partial \pi_3} = 0 ;$$

$$\frac{\partial(T + U)}{\partial \pi_4} = \beta_{44} \cdot \frac{\partial(T + U)}{\partial \chi} = [m_b b \cdot \sin \chi + 2m_d r_d \cdot \sin(\alpha_d + \chi)] R \cdot r s -$$

$$- m_b g b \cdot \sin \chi \cdot \cos \theta .$$

Die quasigeneralisierten Kräfte laut den Formeln (2.37) und (2.39) sind:

$$\Pi_1 = 0; \quad \Pi_2 = 0; \quad \Pi_3 = \beta_{33} \cdot Q_3 = -M_v + f_k \cdot m_w g \cos \theta ; \quad \Pi_4 = \beta_{44} \cdot Q_4 = M_v .$$

Damit bekommen die Gleichungen (2.48) (laut den Quasigeschwindigkeiten $p = -\dot{\theta}$ und $s = \dot{\chi}$) die Form:

$$(m_w R^2 + J_{ca}) \cdot \ddot{\theta} + J_{ca} \cdot q^2 \operatorname{tg} \theta - (m_w R^2 + J_{cp}) \cdot q r + (m_b b + 2m_d d) R \cos \chi \cdot \dot{\chi} q =$$

$$= m_w g R \cdot \sin \theta - (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \sin \theta ;$$

$$J_{ca} \cdot \dot{q} - J_{ca} \cdot \dot{\theta} q \operatorname{tg} \theta + J_{cp} \cdot \dot{\theta} r - (m_b b + 2m_d d) R \cos \chi \cdot \dot{\theta} \dot{\chi} -$$

$$- (m_b b + 2m_d d) R \sin \chi \cdot \dot{\chi} r \operatorname{tg} \theta = 0 ;$$

$$(m_w R^2 + J_{cp}) \cdot \dot{r} + m_w R^2 \cdot \dot{\theta} q - (m_b b + 2m_d d) R \cos \chi \cdot \ddot{\chi} +$$

$$+ (m_b b + 2m_d d) R \sin \chi \cdot (\dot{\chi} q \operatorname{tg} \theta + \dot{\chi}^2) = -M_v + f_k \cdot m_w g \cos \theta ;$$

$$(m_b b^2 + 2m_d r_d^2 + J_w) \cdot \ddot{\chi} - (m_b b + 2m_d d) R \cdot r \dot{\chi} \cdot \sin \chi =$$

$$= M_v - (m_b b + 2m_d d) g \cdot \sin \chi \cos \theta . \quad (2.50)$$

Laut den Formeln (2.18) und (2.19) sind die Projektionen des Vektors der Geschwindigkeit des Radmassenmittelpunkts gleich:

$$\dot{X}_c = -R (\cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \dot{\theta} + \cos \psi \cdot r) ; \quad \dot{Y}_c = R (\cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \dot{\theta} - \sin \psi \cdot r) . \quad (2.51)$$

Um die Formeln für die generalisierten Koordinaten θ und χ und Quasikoordinaten $q = \dot{\psi} \cos \theta$ und $r = \dot{\psi} \sin \theta - \dot{\phi}$ zu erhalten, werden die Gleichungen (2.50) integriert. Um die generalisierten Koordinaten Ψ und Φ zu finden, müssen die Gleichungen $q = \dot{\psi} \cos \theta$ und $r = \dot{\psi} \sin \theta - \dot{\phi}$ integriert werden. Um die generalisierten Koordinaten X_c und Y_c zu erfahren, müssen die Gleichungen (2.51) integriert werden. Dann sind alle sechs verwendeten generalisierten Koordinaten bestimmt.

Am anschaulichsten wird die Raumlage des Rads mit den Koordinaten des Punkts P (Kontaktpunkt mit der XY -Ebene) beschrieben und nicht mit den Koordinaten des Punkts C. Laut Bild 2.9 sind diese Koordinaten:

$$X_p = X_c + (PC^*) \cdot \sin \psi; \quad Y_p = Y_c - (PC^*) \cdot \cos \psi. \quad (2.52)$$

$PC^* = R \cdot \sin \theta$ — Projektion des Radius-Vektors \overline{PC} auf die Ebene XY

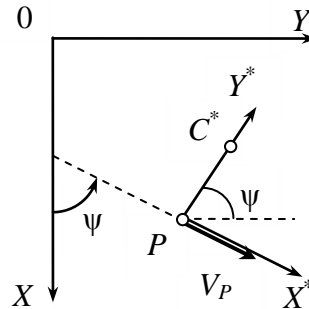


Bild 2.9: Kontaktpunkt des Rads P und Projektion des Radmassenmittelpunkts C

Nach der Differenzierung der Gleichungen (2.52) nach der Zeit laut den Formeln (2.51), erhalten die Projektionen des Vektors der Geschwindigkeit des Punkts P die Form:

$$\begin{aligned} \dot{X}_p &= R(q \operatorname{tg} \theta - r) \cdot \cos \psi = R \dot{\varphi} \cdot \cos \psi; \\ \dot{Y}_p &= R(q \operatorname{tg} \theta - r) \cdot \sin \psi = R \dot{\varphi} \cdot \sin \psi. \end{aligned} \quad (2.53)$$

Dann ist die Geschwindigkeit des Punkts P:

$$V_p = \sqrt{\dot{X}_p^2 + \dot{Y}_p^2} = R(q \operatorname{tg} \theta - r) = R \dot{\varphi}. \quad (2.54)$$

In diesem Fall sind nicht die Gleichungen (2.51), sondern die Gleichungen (2.53) integriert worden.

Wichtig! Das Differentialgleichungssystem (2.50) ist nur durch numerische Rechenmethoden lösbar. Für diesen Zweck kann MathCAD- oder MATLAB-Software verwendet werden.

Beim Lauf des Kreiselgeräts drehen die Kraftmomente die Kreiselrahmen um. Dadurch ändern sich die Achsrichtungen der Kreiselrotoren relativ zur Radachse. Dann muss die kinetische Energie des Kreiselgeräts durch die kinetische Energie dieser Relativbewegung ergänzt werden. Neue ergänzende generalisierte Koordinaten entsprechen diesen neuen Kraftmomenten, die als neue generalisierte Kräfte verwendet werden müssen. Die Anzahl der Gleichungen (2.50) steigt um die Anzahl der neuen Freiheitsgrade, die jeweils den neuen Koordinaten entsprechen.

2.6. Spezifische Fälle der Bewegung des Kugelroboters

Wenn sich der Roboter auf der geneigten Ebene bewegen muss, entsteht die Bewegung nur in folgendem Fall: der Roboter kann das Rollreibungsmoment M_k überwinden. Dann muss die Größe des Moments der Hauptbewegung für folgende Gleichung passen:

$$M_v - f_k \cdot m_w g \cos \theta \geq 0 . \quad (2.55)$$

Wenn der Neigungswinkel der geneigten Ebene θ konstant ist ($\theta = \theta_0 = \text{const}$) und der Roboter sich gleichmäßig bewegt ($V = \text{const}$), ist das Kraftmoment M_v :

$$M_v = f_k \cdot m_w g \cos \theta_0 .$$

Dadurch gleicht das rechte Glied der dritten Gleichung des Systems (2.50) Null. Wenn diese Formel für das Moment M_v im rechten Glied der vierten Gleichung des Systems (2.50) eingesetzt und diese Gleichung zu Null gleichgesetzt wird, dann wird folgende Formel entwickelt:

$$f_k \cdot m_w g \cos \theta_0 - (m_b b + 2m_d d) g \cdot \sin \chi_0 \cdot \cos \theta_0 = 0 .$$

Dann reicht für entsprechenden Neigungswinkel des Pendels:

$$\sin \chi_0 = f_k \cdot m_w / (m_b b + 2m_d d) . \quad (2.56)$$

Wenn die generalisierten Koordinaten θ und χ konstant sind ($\theta = \theta_0$ und $\chi = \chi_0$) bzw. die rechten Glieder der dritten und der vierten Gleichung des Systems (2.50) Null gleichen, werden die folgenden Quasikoordinaten auch konstant:

$$q = q_0 = \dot{\psi} \cos \theta_0 = \text{const}; \quad r = r_0 = \dot{\psi} \sin \theta_0 - \dot{\phi}_0 = \text{const} .$$

Dadurch werden auch die generalisierten Geschwindigkeiten konstant:

$$\psi = \dot{\psi}_0 = \text{const}; \quad \varphi = \dot{\phi}_0 = \text{const} .$$

Dann sind die Winkel ψ und φ :

$$\psi = \dot{\psi}_0 \cdot t; \quad \varphi = \dot{\phi}_0 \cdot t . \quad (2.57)$$

Die Permutationen dieser Formeln in den Gleichungen (2.53) ergeben die Gleichungen:

$$\dot{X}_p = R \dot{\phi}_0 \cdot \cos(\dot{\psi}_0 t); \quad \dot{Y}_p = R \dot{\phi}_0 \cdot \sin(\dot{\psi}_0 t) . \quad (2.58)$$

Das Integrieren der Gleichungen (2.58) ergibt die Koordinaten des Kontaktpunkts P in der parametrischen Form:

$$X_p = X_{p_0} + \frac{\dot{\phi}_0}{\dot{\psi}_0} \cdot R \sin(\dot{\psi}_0 t); \quad Y_p = Y_{p_0} - \frac{\dot{\phi}_0}{\dot{\psi}_0} \cdot R \cos(\dot{\psi}_0 t) ,$$

wobei X_{p_0} und Y_{p_0} Integrationskonstanten sind.

Dann ist die explizite Form der Gleichung des Rollwegs des Roboters:

$$(X_p - X_{p_0})^2 + (Y_p - Y_{p_0})^2 = R_p^2 , \quad (2.59)$$

wobei X_{p_0} und Y_{p_0} die Koordinaten des Zentrums des Kreises mit dem Radius $R_p = R \dot{\phi}_0 / \dot{\psi}_0$ sind. Der Kontaktpunkt P verschiebt sich in der Form dieses Kreises. Durch das Integrieren der Gleichung (2.54) wird das Gesetz der Bewegung durch diesen Zirkularweg erhalten:

$$S_p = R \dot{\phi}_0 \cdot t = R_p \dot{\psi}_0 \cdot t , \quad (2.60)$$

Wenn der Neigungswinkel des Rads $\theta = \theta_0$ und der Umdrehungswinkel des Pendels $\chi = \chi_0$ konstant sind, rollt das Rad gleichförmig.

Laut der ersten Gleichung des Systems (2.50) folgen die Verhältnisse zwischen den Komponenten q_0 und r_0 :

$$J_{ca} \cdot q_0^2 \operatorname{tg} \theta_0 - (m_w R^2 + J_{cp}) \cdot q_0 r_0 = m_w g R \cdot \sin \theta_0 - (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi_0 \sin \theta_0. \quad (2.61)$$

Wenn das Rad vertikal steht ($\theta_0 = 0$), folgt aus der vorigen Formel:

$$q_0 = 0 \quad (\dot{\psi}_0 = 0) \quad \text{und} \quad r_0 \neq 0 \quad (\dot{\phi}_0 \neq 0)$$

oder:

$$r_0 = 0 \quad (\dot{\phi}_0 = 0) \quad \text{und} \quad q_0 \neq 0 \quad (\dot{\psi}_0 \neq 0).$$

Wenn $q_0 = 0$ ($\dot{\psi}_0 = 0$) und $r_0 \neq 0$ ($\dot{\phi}_0 \neq 0$), rollt das Rad gleichförmig.

Wenn $r_0 = 0$ ($\dot{\phi}_0 = 0$) und $q_0 \neq 0$ ($\dot{\psi}_0 \neq 0$), dreht sich das Rad gleichförmig um den unbeweglichen vertikalen Durchmesser.

Wenn der Roboter sich auf der geneigten Oberfläche bewegt, wird der Neigungswinkel als α_ψ kenngezeichnet. Wenn der Roboter sich aufwärts bewegt, wird der Winkel $\alpha_\psi > 0$, und wenn der Roboter abwärts rollt wird der Winkel $\alpha_\psi < 0$. Der Schwerkraft wird mit Hilfe der zwei Projektionen ($m_w g \sin \alpha_\psi$ und $m_w g \cos \alpha_\psi$) dargestellt (Bild 2.10).

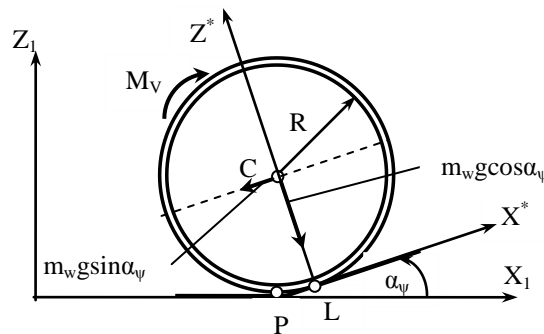


Bild 2.10: Roboter bewegt sich auf der geneigten Oberfläche

Die Größe des Moments M_v der Hauptbewegung soll der Gleichung:

$$M_v - m_w g R \cdot \sin \alpha_\psi - f_k \cdot m_w g \cos \theta \cdot \cos \alpha_\psi \geq 0 \quad (2.62)$$

entsprechen.

Nach der Gleichung (2.62) bewegt sich der Roboter gleichmäßig ($V = \text{const}$), wenn das Moment M_v ist:

$$M_v = m_w g R \cdot \sin \alpha_\psi + f_k \cdot m_w g \cos \theta \cdot \cos \alpha_\psi.$$

In speziellen Situationen der Bewegung soll der Roboter Hindernisse (bspw. Stufen) überwinden. Eine Stufe liegt zur Richtung der Roboterbewegung senkrecht (Bild 2.11) und hat eine Höhe von $LN = H$. Um dieses Hindernis zu überwinden, soll das Kraftmoment M_v wie in der Formel (2.55) folgender Gleichung entsprechen:

$$M_v - f_h \cdot m_w g \cos \theta \geq 0, \quad (2.56)$$

wobei $f_h = PN$ der Horizontalabstand zwischen den Punkten P und L ist. Das sind die Kontaktpunkte zwischen dem Rad mit dem Radius $R = PC$ und der Fläche XY vor (P) und nach dem Überwinden der Stufe (L).

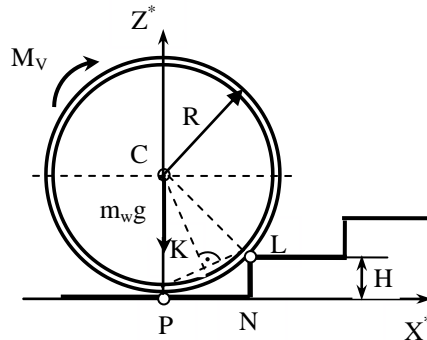


Bild 2.11: Schema des Roboters vor dem Hindernis (Stufe)

Laut Bild 2.11 der gleichen Winkel ist:

$$\sin(\angle PCK) = 0,5 PL / R ; \quad \sin(\angle LPN) = H / PL .$$

Daraus folgt:

$$PL^2 = 2R \cdot H = f_h^2 + H^2 .$$

Weil $PL^2 = f_h^2 + H^2$, ergibt sich folgende Gleichung:

$$f_h = \sqrt{2RH - H^2} . \quad (2.64)$$

Die komplexe geometrische Größe f_h (2.64) kann in der Gleichung (2.63) verwendet werden, um zu prüfen, ob der Roboter mit dem Radius R und dem Kraftmoment M_v das Hindernis mit der Höhe H überwinden kann. Die inverse Aufgabe ist auch lösbar, wenn mit der geforderten Höhe H und dem Radius R das Kraftmoment M_v bestimmt werden soll.

2.7. Bewegungsgleichungen des Roboters bei der Bewegung mit einem großen Neigungswinkel der Roboterrollebene

Die Bewegungsgleichungen des Roboters, der in Bild 2.1 dargestellt ist, werden im Punkt 2.7. nicht für ein Rad, sondern für eine Kugel entwickelt. Diese starre Kugel rollt auf einer planaren Oberfläche XY und ist mit einem sphärischen Pendel ausgerüstet. Der Abhängpunkt des Pendels befindet sich in dem Massenmittelpunkt C (Bild 2.12) der Kugel. Wie beim Rollen des Rads (siehe Anfang des Punkts 2.6.) entsteht die Neigung des Pendels in der Ebene xy um den Winkel χ unter der Wirkung des Rollmoments M_v . Das Moment für die Änderung der Bewegungsrichtung M_r wirkt in der Ebene xy und dreht das Pendel um den Winkel ϑ .

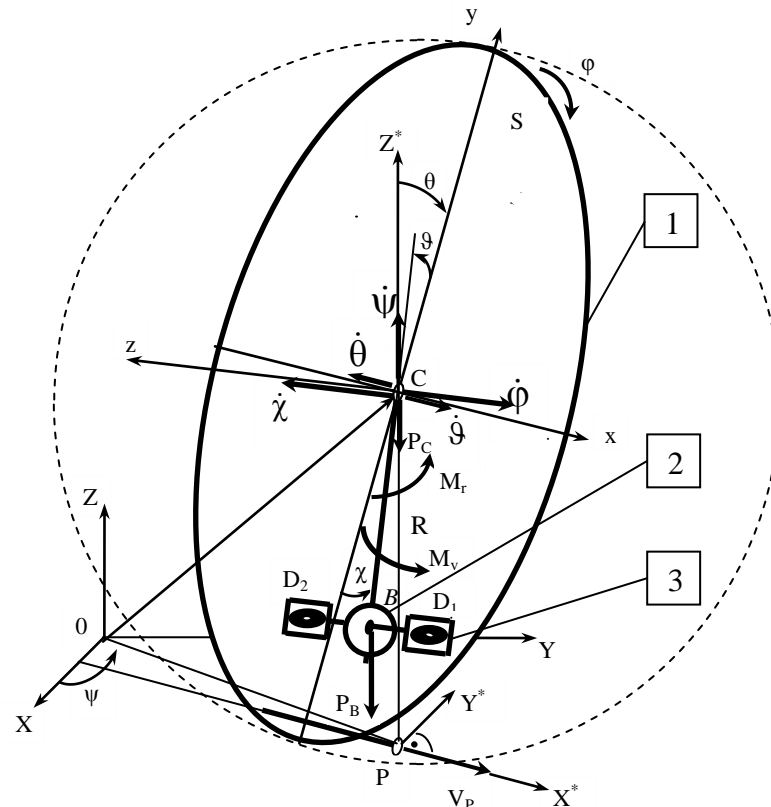


Bild 2.12: Schema der Bewegung des Roboters bei einem großen Neigungswinkel der Roboterrollebene (Symmetrieebene) S

Das Kugelgehäuse kann beispielsweise zwei Seitendeckel haben. Da der Roboter eine Symmetrieebene S hat, muss das Robotergehäuse keine Vollkugel sein. Dennoch kann diese Ebene S einen entscheidenden Einfluss im weiteren Entwicklungsprozess des Roboters haben. Die Trägheitsmomente der Hüllkugel um die Achsen, die in dieser Ebene liegen, sind: $J_{cx} = J_{cy} = J_{ca}$. Das Trägheitsmoment der Hüllkugel relativ zur S-Ebene der senkrechten Achsen ist: $J_{cz} = J_{cp} = 2J_{ca}$.

Wenn die Neigungswinkel der S-Ebene relativ groß werden, verliert diese Ebene den Kontaktpunkt P zwischen dem Roboter und der Bewegungsfläche. Wenn jedoch der Neigungswinkel klein ist, ist der Neigungswinkelkosinus approximativ ungefähr 1, übersteigt aber diesen Wert nicht. Dann ist die Größe des Vektors $\overline{PC}(0, R, 0)$ im beweglichen Koordinatensystem Cxyz konstant (siehe Bild 2.6). Bei einem großen ($>8^\circ$) Neigungswinkel der S-Ebene ist der Vektor $\overline{PC}(0, 0, R)$ im starren Koordinatensystem OXYZ konstant (siehe

Bild 2.8). Aus diesem Grund ist die Verwendung des Koordinatensystems XYZ für die Entwicklung der Bewegungsgleichungen des Kugelroboters am besten geeignet.

Das schlupffreie Rollen der Kugel auf einer planaren Oberfläche ist in den Quellen [50,52-60] ausführlich beschrieben (das geometrische Zentrum der Kugel kongruiert mit seinem Massenmittelpunkt). Zudem werden die Bewegungsarten der Hüllkugel mit dem innerseitigen Kreiselgerät erforscht.

In der Quelle [26] sind die Forschungen zur Bewegung des Roboters beschrieben, der mit dem Trägheitsstabilisierungssystem ausgerüstet ist. Die Achse des Hauptbewegungsantriebs des Roboters liegt senkrecht zu der Achse der beiden exzentrischen Schwungräder. Aus diesem Grund können zwei verschiedene Bewegungskräfte verwendet werden: die Schwerkraft und das Drehmoment. Diese Bauart der inneren Elemente des Roboters hat sich gut mit dem sphärischen Pendel kombinieren lassen. Das System der differentialen Bewegungsgleichungen (Lagrange-Gleichungen) in Matrizenform ist für die Bewegung des Roboters unter Berücksichtigung der kinematischen Verbindungen entwickelt worden. Danach sind numerische Lösungen dieser Gleichungen für einige besondere Fälle der Roboterbewegung entwickelt worden.

In den Quellen [31,32] sind die Forschungen der Bewegung des Roboters mit einem doppelten Kreiselgerät beschrieben (Bild 1.12). Dieser Roboter bewegt sich mit Hilfe des sphärischen Pendels, das eine zweiaxiale Abhängung im Massenmittelpunkt der Hüllkugel hat. Durch das Drehen des Pendels um die Achsen der Abhängung entsteht die Hauptbewegung des Roboters, oder er ändert dadurch seine Bewegungsrichtung. Das Drehen der Kreiselrahmen des Roboterkreiselgeräts entwickelt die Hilfsmomente, die für die schnelle Beschleunigung oder das Bremsen des Roboters benötigt werden. Diese Hilfsmomente können auch für die Überwindung kleinerer Hindernisse genutzt werden. Die Effektivität der Verwendung des Kreiselgeräts für die Überwindung kleiner Hindernisse ist relativ hoch. Der Roboter kann Hindernisse überwinden, die bis zu einem Drittel seines Hüllkugeldurchmessers ausmachen. Aber dieser Roboter besitzt keinen Sprungmechanismus. Für die Roboterhauptbewegung bei inaktiven Kreiseln ist ein System der nichtlinearen differentialen Bewegungsgleichungen (Lagrange-Gleichungen) unter Berücksichtigung der kinematischen Verbindungen entwickelt worden. Das sind lineare Differentialgleichungen siebter Ordnung, die mit Hilfe von MATLAB gelöst worden sind.

Für den Mechanismus mit dem sphärischen Pendel, der in Bild 2.12 dargestellt ist, werden die folgenden sieben generalisierten Koordinaten benötigt:

- zwei lineare Koordinaten X_c und Y_c des Massenmittelpunkts C der Hüllkugel
- φ —Eigendrehungswinkel der Hüllkugel um die Cz-Achse
- Ψ —Umlenkungswinkel der Hüllkugel Winkel zwischen der 0X-Achse und der Hüllkugeltangente im Kontaktpunkt P in der Bewegungsrichtung)
- θ —Neigungswinkel der Symmetrieebene (Winkel zwischen der Senkrechten im Kontaktpunkt P und der Symmetrieebene xy)
- χ — Drehwinkel des Pendels um die z-Achse in der Symmetrieebene xy (in der Rollebene der Hüllkugel)
- ϑ —Neigungswinkel der Massenmittelpunktlinie CB zur xy-Ebene.

Also bestimmen drei Winkel das Drehen der Symmetrieebene xy und zwei Winkel die Pendelstellung relativ zum Hüllkugelmassenmittelpunkt C.

Sieben generalisierte Koordinaten werden bezeichnet:

$$q_1 = \theta; \quad q_2 = \psi; \quad q_3 = \varphi; \quad q_4 = \chi; \quad q_5 = \vartheta; \quad q_6 = X_c; \quad q_7 = Y_c. \quad (2.65)$$

Laut Bild 2.12 ist die Koordinate des Schwerpunkts der Hüllkugel:

$$Z_c = R = \text{const.}$$

Für den Roboter werden fünf Quasigeschwindigkeiten verwendet. Drei Quasigeschwindigkeiten (p_* , q_* , r_*) sind die Projektionen des Vektors der absoluten Winkelgeschwindigkeit $\overline{\Omega}_{*C}(p_*, q_*, r_*)$ der Hüllkugel auf die starren Achsen des XYZ-Systems. Die vierte und fünfte Quasigeschwindigkeit ($\dot{\chi}$ und $\dot{\vartheta}$) sind die Projektionen des Vektors der relativen Geschwindigkeiten $\overline{\Omega}_B(\dot{\vartheta}, 0, \dot{\chi})$ des Pendels auf die Achsen Cz und Cx. Die gewählten Quasigeschwindigkeiten werden:

$$\begin{aligned} \dot{\pi}_{*1} = p_* = -\dot{\theta} \cos \psi - \dot{\phi} \sin \psi \cos \theta; \quad \dot{\pi}_{*2} = q_* = -\dot{\theta} \sin \psi + \dot{\phi} \cos \psi \cos \theta; \quad \dot{\pi}_{*3} = r_* = \dot{\psi} - \dot{\phi} \sin \theta; \\ \dot{\pi}_{*4} = \dot{\chi}; \quad \dot{\pi}_{*5} = \dot{\vartheta}, \end{aligned} \quad (2.66)$$

bezeichnet [46].

Laut Bild 2.12 ist der Ortsvektor des Schwerpunkts C der Hüllkugel die Summe der zwei Ortsvektoren:

$$\overline{OC} = \overline{OP} + \overline{PC} (0, 0, R). \quad (2.67)$$

Nach dem Differenzieren dieses Ortsvektors nach der Zeit ergibt sich die Gleichung für die absolute Geschwindigkeit des Punkts C:

$$\overline{V}_C = \overline{OC} = \overline{PC} + \overline{OP} = \overline{\Omega}_{*C} \times \overline{PC} + \overline{V}_P, \quad (2.68)$$

wobei $\overline{V}_P = \overline{OP}$ die Geschwindigkeit des Punkts P ist (Punkt P ist ein Pol).

Die Geschwindigkeit des Momentangeschwindigkeitspols ist $\overline{V}_P = 0$. Dadurch folgt:

$$\overline{V}_C = \overline{\Omega}_{*C} \times \overline{PC} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ p_* & q_* & r_* \\ 0 & 0 & R \end{vmatrix}. \quad (2.69)$$

Laut der Formel (2.16) sind die Projektionen des Vektors der Geschwindigkeit \overline{V}_C im starren Koordinatensystem XYZ:

$$\dot{X}_c = Rq_*; \quad \dot{Y}_c = -Rp_*; \quad \dot{Z}_c = 0. \quad (2.70)$$

Mit Hilfe von (2.66) und (2.70) können die Gleichungen der kinematischen Verbindungen entwickelt werden:

$$u_* = \dot{X}_c - Rq_* = \dot{X}_c - R(-\dot{\theta} \sin \psi + \dot{\phi} \cos \psi \cos \theta) = 0; \quad (2.71)$$

$$v_* = \dot{Y}_c + Rp_* = \dot{Y}_c - R(\dot{\theta} \cos \psi + \dot{\phi} \sin \psi \cos \theta) = 0. \quad (2.72)$$

Diese kinematischen Verbindungen wirken auf die Geschwindigkeit des Schwerpunkts C. Die kinematischen Charakteristika u_* und v_* werden später als zwei Quasigeschwindigkeiten verwendet.

Für die allgemeine Aufgabenstellung, wenn der Winkel der Umlenkung ψ nicht konstant ist, sind die Gleichungen (2.71) und (2.72) nicht integrierbar, und die entsprechenden kinematischen Verbindungen werden *nicht holonom*.

Der auf dem Bild 2.12 dargestellte Mechanismus besitzt sieben generalisierte Koordinaten ($N = 7$) und zwei nicht holonome kinematische Verbindungen. Dieser Mechanismus hat auch fünf Freiheitsgrade ($n = 7 - 2 = 5$). Deshalb kann die Bewegung des Roboters mit Hilfe der fünf Differentialgleichungen beschrieben werden. Laut dem Verfahren aus der Quelle [46]

werden mit fünf Quasigeschwindigkeiten (2.66) auch zwei Quasigeschwindigkeiten (2.71) und (2.72) verwendet:

$$\begin{aligned}\dot{\pi}_{*6} = \mathbf{u}_* &= \dot{\mathbf{X}}_c - \mathbf{R}(-\dot{\theta} \sin \psi + \dot{\phi} \cos \psi \cos \theta) = 0 ; \\ \dot{\pi}_{*7} = \mathbf{v}_* &= \dot{\mathbf{Y}}_c - \mathbf{R}(\dot{\theta} \cos \psi + \dot{\phi} \sin \psi \cos \theta) = 0 .\end{aligned}\quad (2.73)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichungen (2.71) und (2.72) sind die Projektionen der Geschwindigkeit des Schwerpunkts der Hüllkugel C im starren Koordinatensystem:

$$\dot{\mathbf{X}}_c = \mathbf{u}_* + \mathbf{R} \mathbf{q}_* ; \quad \dot{\mathbf{Y}}_c = \mathbf{v}_* - \mathbf{R} \mathbf{p}_* \quad ; \quad \dot{\mathbf{Z}}_c = 0. \quad (2.74)$$

Laut den Gleichungen (2.74) ist das Quadrat der absoluten Geschwindigkeit des Schwerpunktes C:

$$\begin{aligned}V_c^2 &= \dot{\mathbf{X}}_c^2 + \dot{\mathbf{Y}}_c^2 + \dot{\mathbf{Z}}_c^2 = (\mathbf{u}_* + \mathbf{R} \mathbf{q}_*)^2 + (\mathbf{v}_* - \mathbf{R} \mathbf{p}_*)^2 = \\ &= \mathbf{R}^2 \cdot (\mathbf{p}_*^2 + \mathbf{q}_*^2) + 2\mathbf{R} \cdot (\mathbf{q}_* \mathbf{u}_* - \mathbf{p}_* \mathbf{v}_*) + (\mathbf{u}_*^2 + \mathbf{v}_*^2).\end{aligned}\quad (2.75)$$

Für die Formeln (2.10) und (2.11) gelten Matrixgleichungen:

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{X}}_c^* \\ \dot{\mathbf{Y}}_c^* \\ \dot{\mathbf{Z}}_c^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{X}}_c \\ \dot{\mathbf{Y}}_c \\ \dot{\mathbf{Z}}_c \end{pmatrix} ; \quad \begin{pmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & -\cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{X}}_c^* \\ \dot{\mathbf{Y}}_c^* \\ \dot{\mathbf{Z}}_c^* \end{pmatrix} .$$

Aus diesem Grund entsteht folgendes Verhältnis zwischen den Projektionen des Vektors der Geschwindigkeit des Punktes C in den Koordinatensystemen Cxyz und XYZ:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi \sin \theta & \cos \psi \sin \theta & \cos \theta \\ \sin \psi \cos \theta & -\cos \psi \cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{X}}_c \\ \dot{\mathbf{Y}}_c \\ \dot{\mathbf{Z}}_c \end{pmatrix} . \quad (2.76)$$

Laut den Verhältnissen (2.76) und (2.74) sind die Projektionen des Vektors $\bar{\mathbf{V}}_c$ im Koordinatensystem Cxyz:

$$\begin{aligned}\dot{x}_c &= (\mathbf{u}_* + \mathbf{R} \mathbf{q}_*) \cdot \cos \psi + (\mathbf{v}_* - \mathbf{R} \mathbf{p}_*) \cdot \sin \psi ; \\ \dot{y}_c &= -(\mathbf{u}_* + \mathbf{R} \mathbf{q}_*) \cdot \sin \psi \sin \theta + (\mathbf{v}_* - \mathbf{R} \mathbf{p}_*) \cdot \cos \psi \sin \theta ; \\ \dot{z}_c &= (\mathbf{u}_* + \mathbf{R} \mathbf{q}_*) \cdot \sin \psi \cos \theta - (\mathbf{v}_* - \mathbf{R} \mathbf{p}_*) \cdot \cos \psi \cos \theta .\end{aligned}\quad (2.77)$$

Die Projektionen des Vektors der Winkelgeschwindigkeit $\bar{\Omega}_c(p, q, r)$ im Koordinatensystem Cxyz sind:

$$\begin{aligned}p &= \mathbf{p}_* \cdot \cos \psi + \mathbf{q}_* \cdot \sin \psi ; \\ q &= -\mathbf{p}_* \cdot \sin \psi \sin \theta + \mathbf{q}_* \cdot \cos \psi \sin \theta + \mathbf{r}_* \cdot \cos \theta ; \\ r &= \mathbf{p}_* \cdot \sin \psi \cos \theta - \mathbf{q}_* \cdot \cos \psi \cos \theta + \mathbf{r}_* \cdot \sin \theta .\end{aligned}\quad (2.78)$$

Aus den Gleichungen (2.77) und (2.78) nach den Abbildungen folgt:

$$V_c^2 = \dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2 = (\mathbf{u}_* + \mathbf{R} \mathbf{q}_*)^2 + (\mathbf{v}_* - \mathbf{R} \mathbf{p}_*)^2 ; \quad \Omega_c^2 = p^2 + q^2 + r^2 = \mathbf{p}_*^2 + \mathbf{q}_*^2 + \mathbf{r}_*^2 .$$

Laut dem Eulerschen Gesetz ist die Geschwindigkeit des Schwerpunkts des Pendels B:

$$\bar{\mathbf{V}}_B = \bar{\mathbf{V}}_c + \bar{\mathbf{V}}_{BC} = \bar{\mathbf{V}}_c + \bar{\Omega}_B \times \bar{\mathbf{BC}} = \begin{vmatrix} \bar{\mathbf{i}} & \bar{\mathbf{j}} & \bar{\mathbf{k}} \\ \dot{\vartheta} & 0 & \dot{\chi} \\ b \sin \chi & -b \cos \chi \cos \vartheta & -b \cos \chi \sin \vartheta \end{vmatrix} ,$$

wenn der Punkt C laut der Formel (2.16) ein Pol ist. Für diese Gleichung sind die Projektionen des Vektors $\bar{\mathbf{BC}}$ der relativen Geschwindigkeit $\bar{\mathbf{V}}_{BC}$ schematisch in Bild 2.13

bestimmt (Schema der Positionierung der Schwerpunkte der Hüllkugel, des Pendels und der Kreisel). Dadurch sind die Projektionen des \overline{BC} im Koordinatensystem $Cxyz$:

$$\dot{x}_{BC} = b\dot{\chi} \cdot \cos \chi \cos \vartheta; \quad \dot{y}_{BC} = b(\dot{\chi} \cdot \sin \chi + \dot{\vartheta} \cdot \cos \chi \sin \vartheta); \quad \dot{z}_{BC} = -b\dot{\vartheta} \cdot \cos \chi \cos \vartheta. \quad (2.79)$$

Das Quadrat der relativen Geschwindigkeit der BC-Strecke ist:

$$V_{BC}^2 = \dot{x}_{BC}^2 + \dot{y}_{BC}^2 + \dot{z}_{BC}^2 = b^2 [\dot{\chi}^2 \cdot (\sin^2 \chi + \cos^2 \chi \cos^2 \vartheta) + \dot{\vartheta}^2 \cdot \cos^2 \chi + \dot{\chi} \dot{\vartheta} \cdot \sin 2\chi \sin \vartheta]. \quad (2.80)$$

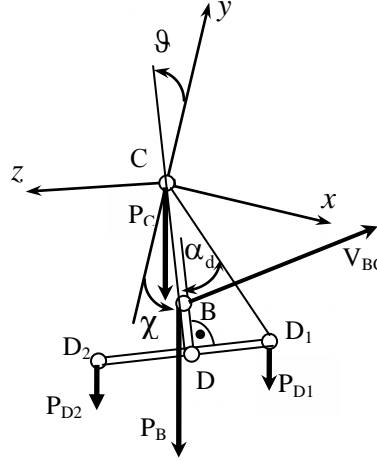


Bild 2.13: Schema der Positionierung der Schwerpunkte der Hüllkugel, des Pendels und der Kreisel

Weil:

$$V_B^2 = (\dot{x}_C + \dot{x}_{BC})^2 + (\dot{y}_C + \dot{y}_{BC})^2 + (\dot{z}_C + \dot{z}_{BC})^2 = V_C^2 + V_{BC}^2 + 2(\dot{x}_C \dot{x}_{BC} + \dot{y}_C \dot{y}_{BC} + \dot{z}_C \dot{z}_{BC}) \text{ ist,}$$

ist das Quadrat der absoluten Geschwindigkeit des Schwerpunkts des Pendels laut den Gleichungen (2.77) und (2.79):

$$\begin{aligned} V_B^2 = & R^2 \cdot (p_*^2 + q_*^2) + 2R \cdot (q_* u_* - p_* v_*) + (u_*^2 + v_*^2) + \\ & + b^2 [\dot{\chi}^2 \cdot (\sin^2 \chi + \cos^2 \chi \cos^2 \vartheta) + \dot{\vartheta}^2 \cdot \cos^2 \chi + \dot{\chi} \dot{\vartheta} \cdot \sin 2\chi \sin \vartheta] + \\ & + 2b \{ (u_* + Rq_*) \cdot [\dot{\chi} \cdot (\cos \chi \cos \vartheta \cos \psi \cos \vartheta - \sin \chi \sin \vartheta \sin \theta) - \\ & - \dot{\vartheta} \cdot \cos \chi \sin \vartheta (\sin \theta \sin \vartheta + \cos \theta \cos \vartheta)] + \\ & + (v_* - Rp_*) \cdot [\dot{\chi} \cdot (\cos \chi \sin \vartheta \cos \theta + \sin \chi \cos \vartheta \sin \theta) + \\ & + \dot{\vartheta} \cdot \cos \chi \cos \vartheta (\sin \theta \sin \vartheta + \cos \theta \cos \vartheta)] \} . \end{aligned} \quad (2.81)$$

Laut der Positionierung der Schwerpunkte in Bild 2.14 sind die Quadrate der Geschwindigkeiten der Schwerpunkte der Kreisel:

$$\begin{aligned} V_{D_{1,2}}^2 = & R^2 \cdot (p_*^2 + q_*^2) + 2R \cdot (q_* u_* - p_* v_*) + (u_*^2 + v_*^2) + \\ & + r_d^2 [\dot{\chi}^2 \cdot (\sin^2(\chi \pm \alpha_d) + \cos^2(\chi \pm \alpha_d) \cos^2 \vartheta) + \dot{\vartheta}^2 \cdot \cos^2(\chi \pm \alpha_d) + \dot{\chi} \dot{\vartheta} \cdot \sin 2(\chi \pm \alpha_d) \sin \vartheta] + \\ & + 2r_d \{ (u_* + Rq_*) \cdot [\dot{\chi} \cdot (\cos(\chi \pm \alpha_d) \cos \vartheta \cos \psi \cos \vartheta - \sin(\chi \pm \alpha_d) \sin \vartheta \sin \theta) - \\ & - \dot{\vartheta} \cdot \cos(\chi \pm \alpha_d) \sin \vartheta (\sin \theta \sin \vartheta + \cos \theta \cos \vartheta)] + \\ & + (v_* - Rp_*) \cdot [\dot{\chi} \cdot (\cos(\chi \pm \alpha_d) \sin \vartheta \cos \theta + \sin(\chi \pm \alpha_d) \cos \vartheta \sin \theta) + \\ & + \dot{\vartheta} \cdot \cos(\chi \pm \alpha_d) \cos \vartheta (\sin \theta \sin \vartheta + \cos \theta \cos \vartheta)] \} , \end{aligned} \quad (2.82)$$

wobei r_d der Abstand zwischen dem Schwerpunkt des Kreisels und dem Punkt C ist.

Wie in den Gleichungen für die Bewegung des Rads (siehe Kap. 2.5.) ist der gesamte Schwerpunkt der Kreisel D auf der Strecke CB ($d = CD = r_d \cos \alpha_d$) und:

$$r_d^2 = (CD)^2 + (DD_{1,2})^2, \quad \operatorname{tg} \alpha_d = DD_{1,2}/CD.$$

Nach dem Satz von König ist die kinetische Energie des Mechanismus:

$$T = T_C + T_\Omega,$$

wobei T_C die kinetische Energie der Translationsbewegung der Elemente dieses Mechanismus ist:

$$T_C = \frac{1}{2} [m_C V_C^2 + m_B V_B^2 + m_d (V_{D_1}^2 + V_{D_2}^2)]$$

und T_Ω die kinetische Energie der Drehbewegung dieser Elemente:

$$T_\Omega = \frac{1}{2} [J_{ca} (p^2 + q^2) + J_{cp} r^2 + (J_{bc} + 2J_{dc} + 2J_g) (\dot{\chi}^2 + \dot{\vartheta}^2)].$$

Unter Berücksichtigung der Gleichungen (2.75), (2.81) und (2.82) für die T_C und der Formeln (2.78) für T_Ω ist die kinetische Energie des Mechanismus (nach den Abbildungen):

$$\begin{aligned} T = & 0,5 m_w \cdot [R^2 \cdot (p_*^2 + q_*^2) + 2R \cdot (q_* u_* - p_* v_*) + (u_*^2 + v_*^2)] + \\ & + 0,5 (m_b b^2 + 2m_d r_d^2) [\dot{\chi}^2 \cdot (\sin^2 \chi + \cos^2 \chi \cos^2 \vartheta) + \dot{\vartheta}^2 \cdot \cos^2 \chi + \dot{\chi} \dot{\vartheta} \cdot \sin 2\chi \sin \vartheta] + \\ & + (m_b b + 2m_d d) [(u_* + Rq_*) \cdot (\dot{\chi} \cdot f_{(1)} + \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\psi}) + (-v_* + Rp_*) \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\psi} - \dot{\vartheta} \cdot f_{(2)})] + \\ & + 0,5 J_{ca} \cdot [p_*^2 \cdot (\cos^2 \psi + \sin^2 \psi \sin^2 \theta) + q_*^2 \cdot (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \sin^2 \theta) + r_*^2 \cos^2 \theta] + \\ & + 0,5 J_{cp} \cdot [p_*^2 \cdot \sin^2 \psi \cos^2 \theta + q_*^2 \cos^2 \psi \cos^2 \theta + r_*^2 \sin^2 \theta] + 0,5 J_w \cdot (\dot{\chi}^2 + \dot{\vartheta}^2) + J_g \Omega_g^2 + \\ & + 0,25 (J_{ca} - J_{cp}) \cdot (p_* q_* \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta - p_* r_* \cdot \sin \psi \sin 2\theta + q_* r_* \cdot \cos \psi \sin 2\theta), \quad (2.83) \end{aligned}$$

wobei $m_w = m_c + m_b + 2m_d$ und $J_w = J_{bc} + 2J_{dc} + 2J_g$ sind (wie in den Gleichungen für die Bewegung des Rads). Für diese Formeln der kinetischen Energie werden folgende Funktionen und ihre Derivationen verwendet:

$$f_{(1)} = \cos \chi \cos \psi \cos \theta - \sin \chi \sin \psi \sin \theta, \quad f'_{(1)\psi} = -\cos \chi \sin \psi \cos \theta - \sin \chi \cos \psi \sin \theta;$$

$$f_{(2)} = \cos \chi \cos \psi (\sin \theta \sin \vartheta + \cos \theta \cos \vartheta), \quad f'_{(2)\psi} = -\cos \chi \sin \psi (\sin \theta \sin \vartheta + \cos \theta \cos \vartheta).$$

Folgende Schwerkräfte sind in Bild 2.14 dargestellt:

$$P_C = m_c g - \text{Schwerkraft der Hüllkugel}$$

$$P_B = m_b g - \text{Schwerkraft des sphärischen Pendels}$$

$$P_{D_{1,2}} = m_d g - \text{Schwerkräfte der Kreisel}$$

Laut der Quelle [43] ist die Funktion der potentiellen Energie für die Hüllkugel:

$$U(\theta, \chi, \vartheta) = (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cos \vartheta \cdot \cos \theta. \quad (2.84)$$

Die Summe aller Elementararbeiten der auf das sphärische Pendel wirkenden Momente M_v und M_r ist:

$$\delta A_{M_v} + \delta A_{M_r} = M_v \cdot (\delta \varphi + \delta \chi) + M_r \cdot (\delta \theta + \delta \vartheta).$$

Die Elementararbeit des Moments der Rollreibung M_k gleicht:

$$\delta A_{M_k} = -M_k \cdot \delta \varphi = -f_k \cdot m_w g \cos \theta \cdot \delta \varphi.$$

Die Elementararbeit aller generalisierten Kräfte Q_i ist:

$$\delta A = \sum_{j=1}^N Q_j \cdot \delta q_j = \delta A_{M_v} + \delta A_{M_r} + \delta A_{M_k}.$$

Dadurch sind die den generalisierten Koordinaten (2.65) entsprechenden generalisierten Kräfte:

$$Q_1 = M_r; \quad Q_2 = 0; \quad Q_3 = M_v - f_k \cdot m_w g \cos \theta; \quad Q_4 = M_v; \quad Q_5 = M_r; \quad Q_6 = 0; \quad Q_7 = 0. \quad (2.85)$$

Die Matrixschreibform der Quasigeschwindigkeiten (2.66), (2.71) und (2.72) ist:

$$\begin{pmatrix} \dot{p}_* \\ \dot{q}_* \\ \dot{r}_* \\ \dot{\chi} \\ \dot{\vartheta} \\ \dot{u}_* \\ \dot{v}_* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \psi & 0 & -\sin \psi \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ R \sin \psi & 0 & -R \cos \psi \cos \theta & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -R \cos \psi & 0 & -R \sin \psi \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\chi} \\ \dot{\vartheta} \\ \dot{X}_C \\ \dot{Y}_C \end{pmatrix}. \quad (2.86)$$

Die Determinante der entsprechenden Matrix $\|\alpha_{*ij}\|$ gleicht Null nicht. Mit Hilfe der inversen Matrix $\|\beta_{*jk}\| = \|\alpha_{*ij}\|^{-1}$ können die generalisierten Geschwindigkeiten folgende Matrixschreibform haben:

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\chi} \\ \dot{\vartheta} \\ \dot{X}_C \\ \dot{Y}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \psi \operatorname{tg} \theta & \cos \psi \operatorname{tg} \theta & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \psi \operatorname{sec} \theta & \cos \psi \operatorname{sec} \theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{p}_* \\ \dot{q}_* \\ \dot{r}_* \\ \dot{\chi} \\ \dot{\vartheta} \\ \dot{u}_* \\ \dot{v}_* \end{pmatrix}. \quad (2.87)$$

Laut den Quellen [46,50] haben die Euler-Lagrange-Gleichungen in den Quasikoordinaten folgende Form:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*i}} \right) - \frac{\partial (T+U)}{\partial \pi_{*i}} + \sum_{k=1}^N \dot{\pi}_{*k} \left(\sum_{j=1}^N \gamma_{*ik}^{(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*j}} \right) = \Pi_{*i} \quad (i=1, \dots, n), \quad (2.88)$$

wobei Π_{*i} die quasigeneralisierten Kräfte sind. Diese Kräfte können mit Hilfe der Gleichungen für die Elementararbeit und unter Berücksichtigung der Verhältnisse (2.85) entwickelt werden:

$$\delta A = \sum_{j=1}^N Q_j \cdot \delta q_j = \sum_{j,i=1}^N Q_j \beta_{*ji} \delta \pi_{*i} = \sum_{i=1}^N \Pi_{*i} \delta \pi_{*i}.$$

Die den Quasikoordinaten π_{*i} entsprechenden quasigeneralisierten Kräfte Π_{*i} sind:

$$\Pi_{*i} = \sum_{j=1}^N \beta_{*ji} \cdot Q_j,$$

wobei $\gamma_{*ik}^{(j)}$ die Boltzmann-Koeffizienten sind. Diese Koeffizienten können mit Hilfe der folgenden Gleichung entwickelt werden:

$$\gamma_{*ik}^{(j)} = \sum_{s,r=1}^N \beta_{*si} \beta_{*rk} \cdot \left(\frac{\delta \alpha_{*js}}{\delta q_r} - \frac{\delta \alpha_{*jr}}{\delta q_s} \right). \quad (2.89)$$

Auch folgendes Verhältnis muss berücksichtigt werden:

$$\frac{\partial(T+U)}{\partial \pi_{*i}} = \sum_{j=1}^N \beta_{*ji} \cdot \frac{\partial(T+U)}{\partial q_j}.$$

Mit Hilfe der Verhältnisse (2.86) und (2.87) bzw. unter Berücksichtigung der Gleichung (2.89) und der Quelle [50] können folgende Formeln entwickelt werden:

$$\begin{aligned} d(\delta \pi_{*1}) - \delta(d \pi_{*1}) &= (\delta \theta d\psi - d\theta \delta \psi) \cdot \sin \psi - (\delta \varphi d\psi - d\varphi \delta \psi) \cdot \cos \psi \cos \theta - \\ &\quad - (\delta \theta d\varphi - d\theta \delta \varphi) \cdot \sin \psi \sin \theta = -(d\pi_{*3} \delta \pi_{*2} - d\pi_{*2} \delta \pi_{*3}) ; \\ d(\delta \pi_{*2}) - \delta(d \pi_{*2}) &= (\delta \theta d\psi - d\theta \delta \psi) \cdot \cos \psi + (\delta \varphi d\psi - d\varphi \delta \psi) \cdot \sin \psi \cos \theta - \\ &\quad - (\delta \theta d\varphi - d\theta \delta \varphi) \cdot \cos \psi \sin \theta = (d\pi_{*3} \delta \pi_{*1} - d\pi_{*1} \delta \pi_{*3}) ; \\ d(\delta \pi_{*3}) - \delta(d \pi_{*3}) &= (\delta \theta d\varphi - d\theta) \cdot \cos \theta = -(d\pi_{*2} \delta \pi_{*1} - d\pi_{*1} \delta \pi_{*2}) ; \\ d(\delta \pi_{*4}) - \delta(d \pi_{*4}) &= 0 ; \\ d(\delta \pi_{*5}) - \delta(d \pi_{*5}) &= 0 ; \\ d(\delta \pi_{*6}) - \delta(d \pi_{*6}) &= (\delta \theta d\psi - d\theta \delta \psi) \cdot \cos \psi + (\delta \varphi d\psi - d\varphi \delta \psi) \cdot \sin \psi \cos \theta - \\ &\quad - (\delta \theta d\varphi - d\theta \delta \varphi) \cdot \cos \psi \sin \theta = -R (d\pi_{*3} \delta \pi_{*1} - d\pi_{*1} \delta \pi_{*3}) ; \\ d(\delta \pi_{*7}) - \delta(d \pi_{*7}) &= (\delta \theta d\psi - d\theta \delta \psi) \cdot \sin \psi - (\delta \varphi d\psi - d\varphi \delta \psi) \cdot \cos \psi \cos \theta - \\ &\quad - (\delta \theta d\varphi - d\theta \delta \varphi) \cdot \sin \psi \sin \theta = -R (d\pi_{*3} \delta \pi_{*2} - d\pi_{*2} \delta \pi_{*3}) . \end{aligned}$$

Aus diesen Formeln gelten folgende Boltzmann-Koeffizienten:

$$\begin{aligned} \gamma_{*23}^{(1)} = -\gamma_{*32}^{(1)} = -1 ; \quad \gamma_{*13}^{(2)} = -\gamma_{*31}^{(2)} = 1 ; \quad \gamma_{*12}^{(3)} = -\gamma_{*21}^{(3)} = -1 ; \\ \gamma_{*13}^{(6)} = -\gamma_{*31}^{(6)} = -R ; \quad \gamma_{*23}^{(7)} = -\gamma_{*32}^{(7)} = -R . \end{aligned} \quad (2.90)$$

Andere Koeffizienten $\gamma_{*ik}^{(j)}$ gleichen Null.

Die Derivationen der kinetischen Energie (2.83) müssen nach den Quasigeschwindigkeiten und nach den Quasikoordinaten entwickelt werden. Auf der Basis der Gleichungen der Verbindungen (2.73) werden nach der Differenzierung $u_* = 0$ und $v_* = 0$. Dann gelten folgende Derivationen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*1}} = \frac{\partial T}{\partial p_*} &= [m_w R^2 + J_{ca} (\cos^2 \psi + \sin^2 \psi \sin^2 \theta) + J_{cp} \sin^2 \psi \cos^2 \theta] \cdot p_* + \\ &\quad + 0,25(J_{ca} - J_{cp})(q_* \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta - r_* \cdot \sin \psi \sin 2\theta) + \\ &\quad + (m_b b + 2m_d d) R \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\psi} - \dot{\vartheta} \cdot f_{(2)}) ; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*2}} = \frac{\partial T}{\partial q_*} &= [m_w R^2 + J_{ca} (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \sin^2 \theta) + J_{cp} \cos^2 \psi \cos^2 \theta] \cdot q_* + \\ &\quad + 0,25(J_{ca} - J_{cp})(p_* \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta + r_* \cdot \cos \psi \sin 2\theta) + \\ &\quad + (m_b b + 2m_d d) R \cdot (\dot{\chi} \cdot f_{(1)} + \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\psi}) ; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*3}} = \frac{\partial T}{\partial r_*} &= (J_{ca} \cos^2 \theta + J_{cp} \sin^2 \theta) \cdot r_* + 0,25(J_{ca} - J_{cp})(-p_* \cdot \sin \psi \sin 2\theta + q_* \cdot \cos \psi \sin 2\theta) ; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*4}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{\chi}} &= (m_b b^2 + 2m_d r_d^2) \cdot [\dot{\chi} \cdot (\sin^2 \chi + \cos^2 \chi \cos^2 \vartheta) + 0,5 \dot{\vartheta} \sin 2\chi \sin \vartheta] + \\ &\quad + (m_b b + 2m_d d) R \cdot (q_* \cdot f_{(1)} + p_* \cdot f'_{(1)\psi}) + J_w \cdot \dot{\chi} ; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*5}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{\vartheta}} = (m_b b^2 + 2m_d r_d^2) \cdot [\dot{\vartheta} \cdot \cos^2 \vartheta + 0,5 \dot{\chi} \sin 2\chi \sin \vartheta] +$$

$$+ (m_b b + 2m_d d) R \cdot (q_* \cdot f'_{(2)\psi} - p_* \cdot f_{(2)}) + J_w \cdot \dot{\vartheta} ;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*6}} = \frac{\partial T}{\partial u_*} = m_w R \cdot q_* + (m_b b + 2m_d d) \cdot (\dot{\chi} \cdot f_{(1)} + \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\psi}) ;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*7}} = \frac{\partial T}{\partial v_*} = -m_w R \cdot p_* - (m_b b + 2m_d d) \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\psi} - \dot{\vartheta} \cdot f_{(2)}) ;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = (m_b b + 2m_d d) R [q_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\theta} + \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\theta}) + p_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f''_{(1)\psi\theta} - \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\theta})] +$$

$$+ 0,5(J_{ca} - J_{cp}) \cdot [(p_*^2 \cdot \sin^2 \psi + q_*^2 \cdot \cos^2 \psi - r_*^2) \cdot \sin 2\theta -$$

$$- 0,5 p_* q_* \cdot \sin 2\psi \sin 2\theta - p_* r_* \cdot \sin \psi \cos 2\theta + q_* r_* \cdot \cos \psi \cos 2\theta] ;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \psi} = (m_b b + 2m_d d) R [q_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\psi} + \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\psi}) + p_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f''_{(1)\psi\psi} - \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\psi})] +$$

$$+ 0,5(J_{ca} - J_{cp}) \cdot [(-p_*^2 + q_*^2) \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta +$$

$$+ p_* q_* \cdot \cos 2\psi \cos^2 \theta - 0,5 p_* r_* \cdot \cos \psi \sin 2\theta - 0,5 q_* r_* \cdot \sin \psi \sin 2\theta] ;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \chi} = 0,5(m_b b^2 + 2m_d r_d^2) \cdot (\dot{\chi}^2 \cdot \sin 2\vartheta \sin^2 \vartheta - \dot{\vartheta}^2 \sin 2\chi + 2\dot{\chi} \dot{\vartheta} \cos 2\chi \sin \vartheta) +$$

$$+ (m_b b + 2m_d d) R [q_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\chi} + \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\chi}) + p_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f''_{(1)\psi\chi} - \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\chi})] ;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \vartheta} = 0,5(m_b b^2 + 2m_d r_d^2) \cdot (-\dot{\chi}^2 \cdot \cos^2 \chi \sin 2\vartheta + \dot{\chi} \dot{\vartheta} \sin 2\chi \cos \vartheta) +$$

$$+ (m_b b + 2m_d d) R (q_* \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\vartheta} - p_* f'_{(2)\vartheta}) .$$

Die Summen, die für Verwendung der Quasikoordinaten notwendig werden, sind:

$$\sum_{k=1}^N \dot{\pi}_{*k} \left(\sum_{j=1}^N \gamma_{*1k}^{(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*j}} \right) = \dot{\pi}_{*3} \cdot \left(\gamma_{*13}^{(2)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*2}} + \gamma_{*13}^{(6)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*6}} \right) + \dot{\pi}_{*2} \cdot \gamma_{*12}^{(3)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*3}} = r_* \left(\frac{\partial T}{\partial q_*} - R \frac{\partial T}{\partial u_*} \right) - q_* \frac{\partial T}{\partial r_*} =$$

$$= [J_{ca} (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \sin^2 \theta - \cos^2 \theta) + J_{cp} (\cos^2 \psi \cos^2 \theta - \sin^2 \theta)] \cdot q_* r_* +$$

$$+ 0,25(J_{ca} - J_{cp}) [p_* q_* \cdot \sin \psi \sin 2\theta + p_* r_* \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta + (r_*^2 - q_*^2) \cdot \cos \psi \sin 2\theta] ;$$

$$\sum_{k=1}^N \dot{\pi}_{*k} \left(\sum_{j=1}^N \gamma_{*2k}^{(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*j}} \right) = \dot{\pi}_{*3} \cdot \left(\gamma_{*23}^{(1)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*1}} + \gamma_{*23}^{(7)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*7}} \right) + \dot{\pi}_{*1} \cdot \left(\gamma_{*21}^{(3)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*3}} \right) = -r_* \left(\frac{\partial T}{\partial p_*} + R \frac{\partial T}{\partial v_*} \right) + p_* \frac{\partial T}{\partial r_*} =$$

$$= -[J_{ca} (\cos^2 \psi + \sin^2 \psi \sin^2 \theta - \cos^2 \theta) + J_{cp} (\sin^2 \psi \cos^2 \theta - \sin^2 \theta)] \cdot p_* q_* +$$

$$+ 0,25(J_{ca} - J_{cp}) [p_* q_* \cdot \cos \psi \sin 2\theta - q_* r_* \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta + (r_*^2 - p_*^2) \cdot \sin \psi \sin 2\theta] ;$$

$$\sum_{k=1}^N \dot{\pi}_{*k} \left(\sum_{j=1}^N \gamma_{*3k}^{(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*j}} \right) = \dot{\pi}_{*2} \cdot \left(\gamma_{*32}^{(1)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*1}} + \gamma_{*32}^{(7)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*7}} \right) + \dot{\pi}_{*1} \cdot \left(\gamma_{*31}^{(2)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*2}} + \gamma_{*31}^{(6)} \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*6}} \right) =$$

$$= q_* \left(\frac{\partial T}{\partial p_*} + R \frac{\partial T}{\partial v_*} \right) - p_* \left(\frac{\partial T}{\partial q_*} - R \frac{\partial T}{\partial u_*} \right) =$$

$$= [J_{ca} (\cos^2 \psi + \sin^2 \psi \sin^2 \theta - \sin^2 \theta - \cos^2 \psi \sin^2 \theta) + J_{cp} (\sin^2 \psi \cos^2 \theta - \cos^2 \psi \cos^2 \theta)] \cdot p_* q_* -$$

$$- 0,25(J_{ca} - J_{cp}) [p_* r_* \cdot \cos \psi \sin 2\theta + q_* r_* \cdot \sin \psi \sin 2\theta + (p_*^2 - q_*^2) \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta] ;$$

$$\sum_{k=1}^N \dot{\pi}_{*k} \left(\sum_{j=1}^N \gamma_{*4k}^{(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*j}} \right) = 0 ; \quad \sum_{k=1}^N \dot{\pi}_{*k} \left(\sum_{j=1}^N \gamma_{*5k}^{(j)} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\pi}_{*j}} \right) = 0 .$$

Die Derivationen der Funktion $(T + U)$ nach den Quasikoordinaten sind:

$$\frac{\partial(T+U)}{\partial \pi_{*1}} = \beta_{*11} \cdot \frac{\partial(T+U)}{\partial \theta} + \beta_{*12} \cdot \frac{\partial(T+U)}{\partial \psi} = -\cos \psi \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} - \sin \psi \cdot \frac{\partial T}{\partial \psi} + \cos \psi \cdot (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cos \vartheta \cdot \sin \theta ;$$

$$\frac{\partial(T+U)}{\partial \pi_{*2}} = \beta_{*21} \cdot \frac{\partial(T+U)}{\partial \theta} + \beta_{*22} \cdot \frac{\partial(T+U)}{\partial \psi} = -\sin \psi t g \theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} + \cos \psi t g \theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \psi} + \sin \psi t g \theta \cdot (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cos \vartheta \cdot \sin \theta ;$$

$$\frac{\partial(T+U)}{\partial \pi_{*3}} = \beta_{*31} \cdot \frac{\partial(T+U)}{\partial \theta} + \beta_{*32} \cdot \frac{\partial(T+U)}{\partial \psi} = -\sin \psi \sec \theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} + \cos \psi \sec \theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \psi} + \sin \psi \sec \theta \cdot (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cos \vartheta \cdot \sin \theta ;$$

$$\frac{\partial(T+U)}{\partial \pi_{*4}} = \beta_{*44} \cdot \frac{\partial(T+U)}{\partial \chi} = \frac{\partial T}{\partial \chi} - (m_b b + 2m_d d) g \cdot \sin \chi \cos \vartheta \cdot \cos \theta ;$$

$$\frac{\partial(T+U)}{\partial \pi_{*5}} = \beta_{*55} \cdot \frac{\partial(T+U)}{\partial \vartheta} = \frac{\partial T}{\partial \vartheta} - (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \sin \vartheta \cdot \cos \theta .$$

Unter Berücksichtigung der Verhältnisse (2.85) und (2.87) sind die quasigeneralisierten Kräfte:

$$\Pi_1 = \beta_{11} Q_1 = -M_r \cdot \cos \psi ; \quad \Pi_2 = \beta_{21} Q_1 + \beta_{23} Q_3 = M_v - f_k \cdot m_w g \cos \theta - M_r \cdot \sin \psi t g \theta ;$$

$$\Pi_3 = \beta_{31} Q_3 = -M_r \cdot \sin \psi \sec \theta ; \quad \Pi_4 = \beta_{44} \cdot Q_4 = M_v ; \quad \Pi_5 = \beta_{55} \cdot Q_5 = M_r .$$

Nach dem Einsetzen dieser Verhältnisse in die Formeln (2.88) gelten folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \{ [m_w R^2 + J_{ca} (\cos^2 \psi + \sin^2 \psi \sin^2 \theta) + J_{cp} \sin^2 \psi \cos^2 \theta] \cdot p_* + \\ & + 0,25(J_{ca} - J_{cp}) (q_* \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta - r_* \cdot \sin \psi \sin 2\theta) + (m_b b + 2m_d d) R \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\psi} - \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)}) \} + \\ & + [J_{ca} (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \sin^2 \theta - \cos^2 \theta) + J_{cp} (\cos^2 \psi \cos^2 \theta - \sin^2 \theta)] \cdot q_* r_* + \\ & + 0,25(J_{ca} - J_{cp}) [p_* q_* \cdot \sin \psi \sin 2\theta + p_* r_* \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta + (r_*^2 - q_*^2) \cdot \cos \psi \sin 2\theta] + \\ & + \cos \psi \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} + \sin \psi \cdot \frac{\partial T}{\partial \psi} = [-M_r + (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cos \vartheta \cdot \sin \theta] \cdot \cos \psi ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \{ [m_w R^2 + J_{ca} (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \sin^2 \theta) + J_{cp} \cos^2 \psi \cos^2 \theta] \cdot q_* + \\ & + 0,25(J_{ca} - J_{cp}) (p_* \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta + r_* \cdot \cos \psi \sin 2\theta) + (m_b b + 2m_d d) R \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)} + \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\psi}) \} - \\ & - [J_{ca} (\cos^2 \psi + \sin^2 \psi \sin^2 \theta - \cos^2 \theta) + J_{cp} (\sin^2 \psi \cos^2 \theta - \sin^2 \theta)] \cdot p_* q_* + \\ & + 0,25(J_{ca} - J_{cp}) [p_* q_* \cdot \cos \psi \sin 2\theta - q_* r_* \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta + (r_*^2 - p_*^2) \cdot \sin \psi \sin 2\theta] + \\ & + \sin \psi t g \theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} - \cos \psi t g \theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \psi} = M_v - f_k \cdot m_w g \cos \theta + \\ & + [-M_r + \sin \psi t g \theta \cdot (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cos \vartheta \cdot \sin \theta] \cdot \sin \psi t g \theta ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dt} \{ (J_{ca} \cos^2 \theta + J_{cp} \sin^2 \theta) \cdot r_* + 0,25(J_{ca} - J_{cp}) (-p_* \cdot \sin \psi \sin 2\theta + q_* \cdot \cos \psi \sin 2\theta) \} + \\
& + [J_{ca} (\cos^2 \psi + \sin^2 \psi \sin^2 \theta - \sin^2 \theta - \cos^2 \psi \sin^2 \theta) + J_{cp} (\sin^2 \psi \cos^2 \theta - \cos^2 \psi \cos^2 \theta)] \cdot p_* q_* - \\
& - 0,25(J_{ca} - J_{cp}) [p_* r_* \cdot \cos \psi \sin 2\theta + q_* r_* \cdot \sin \psi \sin 2\theta + (p_*^2 - q_*^2) \cdot \sin 2\psi \cos^2 \theta] + \\
& + \sin \psi \sec \theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} - \cos \psi \sec \theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \psi} = [-M_r + (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cos \vartheta \cdot \sin \theta] \cdot \sin \psi \sec \theta ; \\
& \frac{d}{dt} \{ (m_b b^2 + 2m_d r_d^2) \cdot [\dot{\chi} \cdot (\sin^2 \chi + \cos^2 \chi \cos^2 \vartheta) + 0,5 \dot{\vartheta} \sin 2\chi \sin \vartheta] + \\
& + (m_b b + 2m_d d) R \cdot (q_* \cdot f_{(1)} + p_* \cdot f'_{(1)\psi}) + J_w \cdot \dot{\chi} \} - \frac{\partial T}{\partial \chi} = \\
& = M_v - (m_b b + 2m_d d) g \cdot \sin \chi \cos \vartheta \cdot \cos \theta ; \\
& \frac{d}{dt} \{ (m_b b^2 + 2m_d r_d^2) \cdot [\dot{\vartheta} \cdot \cos^2 \vartheta + 0,5 \dot{\chi} \sin 2\chi \sin \vartheta] + \\
& + (m_b b + 2m_d d) R \cdot (q_* \cdot f'_{(2)\psi} - p_* \cdot f_{(2)}) + J_w \cdot \dot{\vartheta} \} - \frac{\partial T}{\partial \vartheta} = \\
& = M_r - (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \sin \vartheta \cdot \cos \theta . \tag{2.91}
\end{aligned}$$

Wenn die Hüllkugel des Roboters dynamisch ausgewuchtet ist ($J_{ca} = J_{cp} = J_c$), können die entwickelten Gleichungen reduziert werden. Dann wird die kinetische Energie aus der Gleichung (2.80) ermittelt:

$$\begin{aligned}
T = & 0,5 m_w \cdot [R^2 \cdot (p_*^2 + q_*^2) + 2R \cdot (q_* u_* - p_* v_*) + (u_*^2 + v_*^2)] + \\
& + 0,5 (m_b b^2 + 2m_d r_d^2) [\dot{\chi}^2 \cdot (1 - \cos^2 \chi \sin^2 \vartheta) + \dot{\vartheta}^2 \cdot \cos^2 \chi + \dot{\chi} \dot{\vartheta} \cdot \sin 2\chi \sin \vartheta] + \\
& + (m_b b + 2m_d d) [(u_* + R q_*) \cdot (\dot{\chi} \cdot f_{(1)} + \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\psi}) + (-v_* + R p_*) \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\psi} - \dot{\vartheta} \cdot f_{(2)})] + \\
& + 0,5 J_c \cdot (p_*^2 + q_*^2 + r_*^2) + 0,5 J_w \cdot (\dot{\chi}^2 + \dot{\vartheta}^2) + J_g \Omega_g^2 . \tag{2.92}
\end{aligned}$$

Dadurch haben die Gleichungen (2.91) folgende Form:

$$\begin{aligned}
& (m_w R^2 + J_c) \cdot \dot{p}_* + (m_b b + 2m_d d) R \cdot [(\ddot{\chi} \cdot f'_{(1)\psi} - \ddot{\vartheta} \cdot f_{(2)}) + (\dot{\chi} \cdot \dot{f}'_{(1)\psi} - \dot{\vartheta} \cdot \dot{f}_{(2)})] + \\
& + (m_b b + 2m_d d) R \{ [q_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\theta} + \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\theta}) + p_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f''_{(1)\psi\theta} - \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\theta})] \cos \psi + \\
& + [q_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\psi} + \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\psi}) + p_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f''_{(1)\psi\psi} - \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\psi})] \sin \psi \} = \\
& = [-M_r + (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cos \vartheta \cdot \sin \theta] \cdot \cos \psi ; \\
& (m_w R^2 + J_c) \cdot \dot{q}_* + (m_b b + 2m_d d) R \cdot [(\ddot{\chi} \cdot f_{(1)} + \ddot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\psi}) + (\dot{\chi} \cdot \dot{f}_{(1)} + \dot{\vartheta} \cdot \dot{f}'_{(2)\psi})] + \\
& + (m_b b + 2m_d d) R \{ [q_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\theta} + \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\theta}) + p_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f''_{(1)\psi\theta} - \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\theta})] \sin \psi \operatorname{tg} \theta - \\
& - [q_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\psi} + \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\psi}) + p_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f''_{(1)\psi\psi} - \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\psi})] \cos \psi \operatorname{tg} \theta \} = \\
& = M_v - f_k \cdot m_w g \cos \theta + [-M_r + \sin \psi \operatorname{tg} \theta \cdot (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cos \vartheta \cdot \sin \theta] \cdot \sin \psi \operatorname{tg} \theta ; \\
& J_c \cdot \dot{r}_* + (m_b b + 2m_d d) R \{ [q_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\theta} + \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\theta}) + p_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f''_{(1)\psi\theta} - \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\theta})] \sin \psi \sec \theta - \\
& - [q_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\psi} + \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\psi}) + p_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f''_{(1)\psi\psi} - \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\psi})] \cos \psi \sec \theta \} = \\
& = [-M_r + (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cos \vartheta \cdot \sin \theta] \cdot \sin \psi \sec \theta ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (m_b b^2 + 2m_d r_d^2) \cdot \{ [\ddot{\chi} \cdot (\sin^2 \chi + \cos^2 \chi \cos^2 \vartheta) + 0,5 \ddot{\vartheta} \sin 2\chi \sin \vartheta] + \\
& \quad + [\dot{\chi} \cdot (\sin^2 \chi + \cos^2 \chi \cos^2 \vartheta)'_t + 0,5 \dot{\vartheta} (\sin 2\chi \sin \vartheta)'_t] \} + \\
& \quad + (m_b b + 2m_d d) R \cdot [(\dot{q}_* \cdot f_{(1)} + \dot{p}_* \cdot f'_{(1)\psi}) + (q_* \cdot \dot{f}_{(1)} + p_* \cdot \dot{f}'_{(1)\psi})] + J_w \cdot \ddot{\chi} - \\
& - 0,5(m_b b^2 + 2m_d r_d^2) \cdot (\dot{\chi}^2 \cdot \sin 2\vartheta \sin^2 \vartheta - \dot{\vartheta}^2 \sin 2\chi + 2\dot{\chi} \dot{\vartheta} \cos 2\chi \sin \vartheta) - \\
& - (m_b b + 2m_d d) R [q_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f'_{(1)\chi} + \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\chi}) + p_* \cdot (\dot{\chi} \cdot f''_{(1)\psi\chi} - \dot{\vartheta} \cdot f'_{(2)\chi})] = \\
& \quad = M_v - (m_b b + 2m_d d) g \cdot \sin \chi \cos \vartheta \cdot \cos \theta ; \\
& (m_b b^2 + 2m_d r_d^2) \cdot [(\ddot{\vartheta} \cdot \cos^2 \vartheta + 0,5 \ddot{\chi} \sin 2\chi \sin \vartheta) + (\dot{\vartheta} \cdot (\cos^2 \vartheta)'_t + 0,5 \dot{\chi} \cdot (\sin 2\chi \sin \vartheta)'_t] + \\
& \quad + (m_b b + 2m_d d) R \cdot [(\dot{q}_* \cdot f'_{(2)\psi} - \dot{p}_* \cdot f_{(2)}) + (q_* \cdot \dot{f}'_{(2)\psi} - p_* \cdot \dot{f}_{(2)})] + J_w \cdot \ddot{\vartheta} - \\
& \quad - 0,5(m_b b^2 + 2m_d r_d^2) \cdot (-\dot{\chi}^2 \cdot \cos^2 \chi \sin 2\vartheta + \dot{\chi} \dot{\vartheta} \sin 2\chi \cos \vartheta) - \\
& \quad - (m_b b + 2m_d d) R (q_* \cdot \dot{\vartheta} \cdot f''_{(2)\psi\vartheta} - p_* \cdot f'_{(2)\vartheta}) = \\
& \quad = M_r - (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \sin \vartheta \cdot \cos \theta . \tag{2.93}
\end{aligned}$$

Zu den Gleichungen (2.93) sollen zwei Verhältnisse der kinematischen Verbindungen (2.70) addiert werden:

$$\dot{X}_c = R q_* ; \quad \dot{Y}_c = -R p_* . \tag{2.94}$$

Mit Hilfe der Integrierung der differentialen Gleichungen der Bewegung (2.93) können die Formeln für fünf Quasikoordinaten p_* , q_* , r_* , $\dot{\chi}$, $\dot{\vartheta}$ entwickelt werden, die von den Gleichungen (2.66) bestimmt sind. Die Quasikoordinaten p_* und q_* ermöglichen nach der Integrierung der Gleichungen (2.94) die Entwicklung der Koordinaten des Schwerpunkts der Hüllkugel C.

Weil die Punkte C und P sich in der parallelen Ebenen gleichmäßig bewegen, werden die Gleichungen der Bewegung des Roboters auf der planaren Oberfläche XY in der parametrischen Form entwickelt ($X_p = X_c$; $Y_p = Y_c$).

Wenn das Moment der Änderung der Bewegungsrichtung des Roboters Null ($M_r = 0$) ist, lässt sich das sphärische Pendel (siehe Bild 2.12) in der Ebene xy ($\vartheta = 0$) drehen. Dann wird die kinetische Energie aus der Gleichung (2.80) ermittelt:

$$\begin{aligned}
T = & 0,5 m_w \cdot [R^2 \cdot (p_*^2 + q_*^2) + 2R \cdot (q_* u_* - p_* v_*) + (u_*^2 + v_*^2)] + 0,5(m_b b^2 + 2m_d r_d^2) \cdot \dot{\chi}^2 + \\
& + (m_b b + 2m_d d) \cdot \dot{\chi} \cdot [(u_* + R q_*) \cdot f_{(1)} + (-v_* + R p_*) \cdot f'_{(1)\psi}] + \\
& + 0,5 J_c \cdot (p_*^2 + q_*^2 + r_*^2) + 0,5 J_w \cdot \dot{\chi}^2 + J_g \Omega_g^2 . \tag{2.95}
\end{aligned}$$

Dadurch (wenn $\vartheta = 0$) haben die Gleichungen (2.91) folgende Form:

$$\begin{aligned}
& (m_w R^2 + J_c) \cdot \dot{p}_* + (m_b b + 2m_d d) R \cdot \{ (\ddot{\chi} \cdot f'_{(1)\psi} + \dot{\chi} \cdot \dot{f}'_{(1)\psi}) + \\
& + \dot{\chi} \cdot [(q_* \cdot f'_{(1)\theta} + p_* \cdot f''_{(1)\psi\theta}) \cos \psi + (q_* \cdot f'_{(1)\psi} + p_* \cdot f''_{(1)\psi\psi}) \sin \psi] \} = \\
& \quad = (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi ; \\
& (m_w R^2 + J_c) \cdot \dot{q}_* + (m_b b + 2m_d d) R \cdot \{ (\ddot{\chi} \cdot f_{(1)} + \dot{\chi} \cdot \dot{f}_{(1)}) + \\
& + \dot{\chi} \operatorname{tg} \theta \cdot [(q_* \cdot f'_{(1)\theta} + p_* \cdot f''_{(1)\psi\theta}) \sin \psi - (q_* \cdot f'_{(1)\psi} + p_* \cdot f''_{(1)\psi\psi}) \cos \psi] \} = \\
& \quad = M_v - f_k \cdot m_w g \cos \theta + (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi \operatorname{tg} \theta ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_c \cdot \dot{r}_* + (m_b b + 2m_d d) R \cdot \dot{\chi} \sec \theta \cdot [(q_* \cdot f'_{(1)\theta} + p_* \cdot f''_{(1)\psi\theta}) \sin \psi - (q_* \cdot f'_{(1)\psi} + p_* \cdot f''_{(1)\psi\psi}) \cos \psi] = \\ = (m_b b + 2m_d d) g \cdot \cos \chi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi \sec \theta ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (m_b b^2 + 2m_d r_d^2 + J_w) \cdot \ddot{\chi} + (m_b b + 2m_d d) R \cdot [(\dot{q}_* \cdot f_{(1)} + \dot{p}_* \cdot f'_{(1)\psi}) + (q_* \cdot \dot{f}_{(1)} + p_* \cdot \dot{f}'_{(1)\psi}) - \\ - \dot{\chi} \cdot (q_* \cdot f'_{(1)\chi} + p_* \cdot f''_{(1)\psi\chi})] = M_v - (m_b b + 2m_d d) g \cdot \sin \chi \cos \vartheta \cdot \cos \theta . \quad (2.96) \end{aligned}$$

Hier ist die Funktion $f_{(1)}(\chi, \psi, \theta) = \cos \chi \cos \psi \cos \theta - \sin \chi \sin \psi \sin \theta$ verwendet worden.

Bei der Entwicklung der Gleichungen der Hauptbewegung des Roboters kann das Hilfsmoment berücksichtigt werden. Dieses Moment kann beim Kreiselgerät entwickelt werden. Dann kann die Richtung der Hauptbewegung durch das Drehen des Kreiselrahmens erreicht und die Anzahl der Bewegungsgleichungen (2.96) um zwei vergrößert werden, weil zwei neue dem Kreiselrahmen entsprechende Freiheitsgrade entstehen.

3. MODELLIERUNG UND DIE STEUERUNGSSYSTEMENTWICKLUNG DES ROBOTERS

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Robotermodells (mit Hilfe von *MATLAB*) und des Steuerungssystems beschrieben. Zudem wird die Modellierung der Aufgaben für den Roboter (Bewegung auf der ebenen Oberfläche, Überwindungsprozess der Hindernisse u.a.) beschrieben, woraus dann die Modellierungsergebnisse entnommen werden können. Aus diesen werden dann die Motoren, die Steuerungselektronik und die Akkus gewählt.

3.1. *MATLAB*-Modell

Für die Simulation der Bewegung des Roboters ist die Software *MATLAB SimMechanics* verwendet worden. *MATLAB* wird vielfältig angewendet für die Simulation der Bewegung mechanischer Systeme und sorgt für eine hohe Genauigkeit bei den Ergebnissen.

Das Strukturschema des entwickelten Robotermodells in *MATLAB* zeigt alle Roboter-elemente in ihrem Zusammenwirken sowie das Robotersteuerungssystem und ist in Bild 3.1 dargestellt.

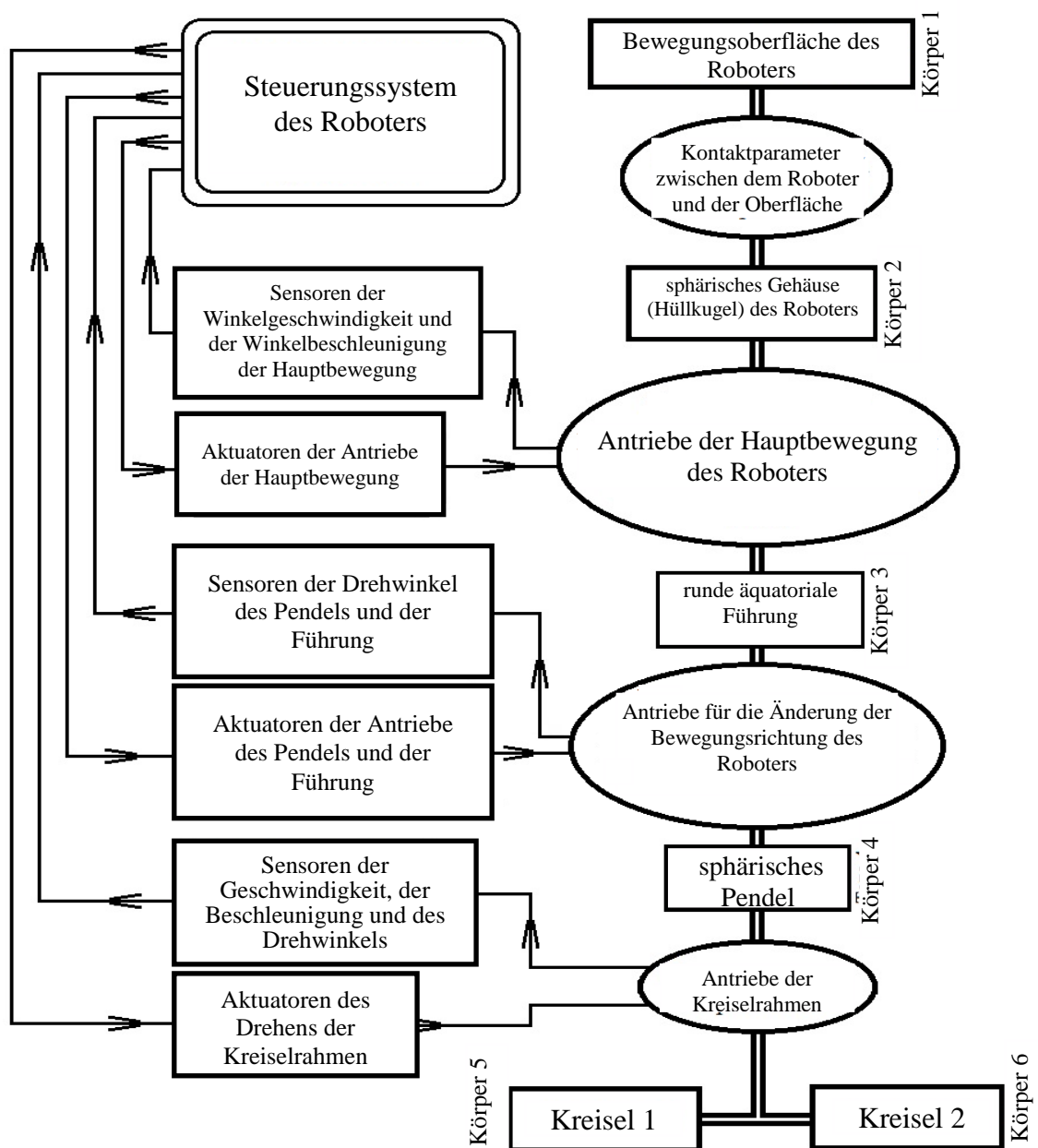


Bild 3.1: Strukturschema des *MATLAB*-Modells

Das dem Bild 3.1 entsprechende MATLAB-Modell ist in Bild 3.2 dargestellt.

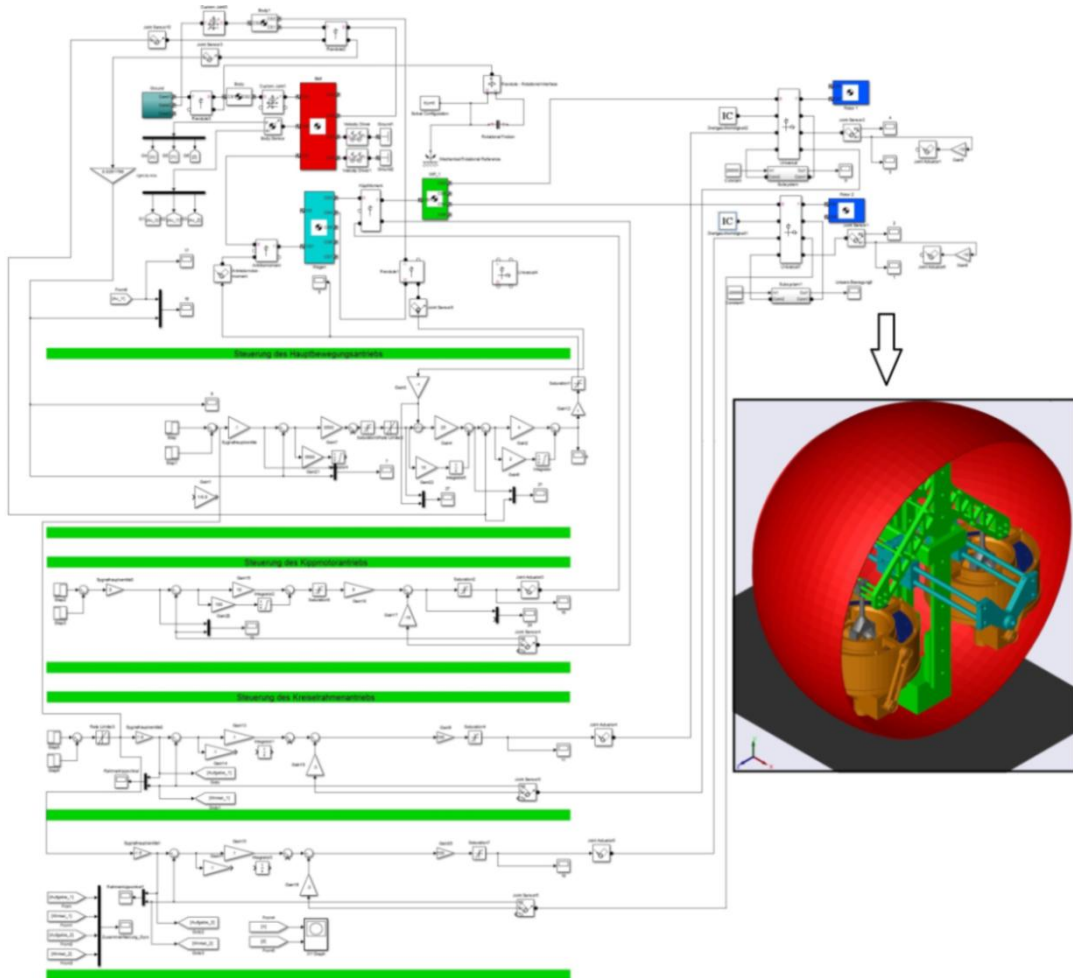


Bild 3.2: MATLAB-Modell des Roboters

Damit das korrekte Modell entwickelt werden kann, müssen die Parameter der Roboterstrukturelemente entsprechend gewählt werden. Das sind die Massen und die Trägheitsmomente, die durch den Entwurf des 3D-Designs des Roboters entwickelt worden sind. Die durch diese Parameterschätzungen erhaltenen Parameter sind in der Tabelle 3.1 dargestellt.

Die Parameter Elemente	Masse	Trägheitsmoment
Kugelgehäuse (Hüllkugel)	2,0 kg	$\begin{pmatrix} 9,4 & 0 & 0 \\ 0 & 9,4 & 0 \\ 0 & 0 & 3,9 \end{pmatrix} \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$
Haupttragwerk und äquatoriale Führung	4,0 kg	$\begin{pmatrix} 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 \end{pmatrix} \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$
sphärisches Pendel	11,0 kg	$\begin{pmatrix} 0,14 & 0 & 0 \\ 0 & 0,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0,22 \end{pmatrix} \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$
Kreiselrotoren	1,5 kg	$\begin{pmatrix} 1,2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1,2 \end{pmatrix} \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$

Tabelle 3.1: Massen und Trägheitsmomente der Roboterstrukturelemente

Wichtig! Das MATLAB-Modell, das in Bild 2.3 dargestellt ist, hat jedoch keine Möglichkeit, den Sprung des Roboters zu simulieren, um die Simulationsgeschwindigkeit dieses Modells zu erhöhen. Deswegen ist für den Sprung des Roboters ein spezielles MATLAB-Modell entwickelt worden.

3.2. Steuerungssystementwicklung.

Das entwickelte Steuerungssystem ist mit dem PID- und P-Regler ausgerüstet [80,81]. Die Struktur des Systems ist in Bild 3.3 dargestellt.

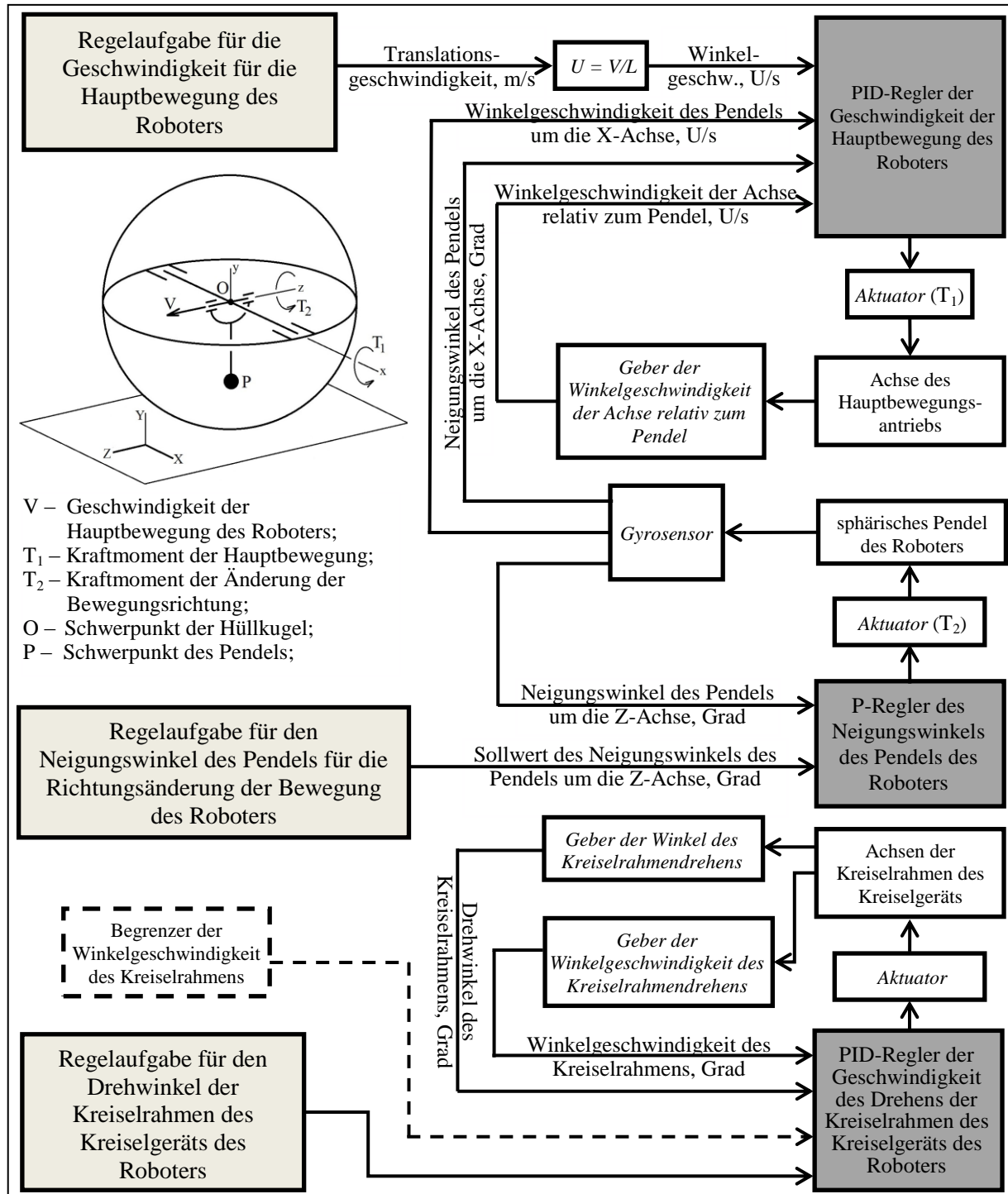


Bild 3.3: Struktur des Steuerungssystems des Roboters

Das Steuerungssystem des entwickelten Roboters verwendet PID-Regler für die Steuerung der Geschwindigkeit der Hauptbewegung und für das Drehen der Kreisrahmen. Für die Steuerung des Neigungswinkels des Pendels wird ein gewöhnlicher P-Regler verwendet.

Der PID-Regler der Geschwindigkeit der Hauptbewegung des Roboters steuert nicht nur die Größe der Winkelgeschwindigkeit des Pendels um die X-Achse und die Größe der Winkelgeschwindigkeit der Antriebsachse des Hauptbewegungsantriebs, sondern auch den Neigungswinkel des Pendels um die X-Achse relativ zur Oberfläche der Bewegung des Roboters. Dieser Winkel lässt den PID-Regler nicht nur die Aufgabe für die Geschwindigkeit lösen, sondern auch die Position des Pendels kontrollieren. Dadurch kann das Pendel bei der Bewegung des Roboters mit höherer Beschleunigung die mögliche 360⁰-Umdrehung um die X-Achse relativ zur Oberfläche XZ verhindern.

Der PID-Regler der Geschwindigkeit des Drehens der Kreiselrahmen des Kreiselgeräts des Roboters kann als „Begrenzer“ der Rahmenwinkelgeschwindigkeit verwendet werden. Dieser „Begrenzer“ ist ein Wert, der die obere Grenze der Drehgeschwindigkeit der Kreiselrahmen festlegt. Diese Möglichkeit der Begrenzung ist auf folgender Basis entwickelt worden. Die Größe der Rahmendrehschwindigkeit für die Verbesserung der Dynamik der Beschleunigung/des Bremsens des Roboters ist viel niedriger als die Größe der Rahmendrehschwindigkeit für die Überwindung eines höheren Hindernisses (bspw. eine Treppe), wenn das Hilfsmoment für den Roboter kurzzeitig und hoch sein muss. Dieser Unterschied ist durch die Simulation der Aufgaben für die Bewegung des Roboters erkannt und aus diesem Grund das Steuerungssystem mit dem „Begrenzer“ der Rahmenwinkelgeschwindigkeit ausgerüstet worden. Dadurch kann das Kreiselgerät auch das Hilfsmoment über längere Zeit entwickeln.

3.3. Simulation der Roboterbewegung

Folgende Aufgaben für den Roboter müssen simuliert werden, damit die dynamischen Parameter (u.a. Geschwindigkeit, Beschleunigung...) bestimmt werden können:

1. Der Roboter soll eine geradlinige Bewegung mit einer Beschleunigung bis zum Sollwert der Geschwindigkeit (2 m/s) erreichen, mit dieser Geschwindigkeit eine gleichmäßige Bewegung ausführen und danach durch eine Bremsung zum Stillstand kommen. Der Roboter bewegt sich auf einer gleichmäßig horizontalen Oberfläche, die keine Hindernisse hat. Die Bewegungsrichtung ist konstant, und das Kreiselgerät nicht in Betrieb.

Der Zweck dieser Aufgabe ist die Bestimmung der dynamischen Parameter (Beschleunigung und Bremsung) des Roboters mit den aufgegebenen Massenträgheitscharakteristika seiner Elemente und dem inaktiven Kreiselgerät.

2. Die Bewegungsaufgabe des Roboters soll dieselbe wie in der ersten Aufgabe sein (eine Beschleunigung in eine weitere gleichmäßige Bewegung mit anschließender Bremsung) nur mit dem Unterschied, dass das Kreiselgerät in Betrieb ist. Auch die Oberflächenparameter sind dieselben wie in der ersten Aufgabe. Die Winkelgeschwindigkeit des Rahmens wird empirisch ausgewählt. Es muss darauf hingewiesen werden, dass bei den technischen Charakteristika des entwickelten Kugelroboters [31-32] Folgendes zu berücksichtigen ist. Die Drehgeschwindigkeit des Kreiselrahmens liegt bei bis zu 120 U/min, um ein möglichst hohes *Hilfsmoment* zu erreichen (u.a. für das Überwinden des Hindernisses in der Aufgabe 4).

Ziele dieser Aufgabe sind die Bestimmung der dynamischen Parameter (Beschleunigung und Bremsung) des Roboters mit dem aktiven Kreiselgerät und der Vergleich der entsprechenden Charakteristika der Bewegung mit jeweils inaktivem und aktivem Kreiselgerät.

3. Für diese Bewegungsaufgabe soll der Roboter beschleunigen und die weitere Bewegung mit einer konstanten Geschwindigkeit und jeweiliger Änderung der Bewegungsrichtung ausführen. Das Kreiselgerät ist hierbei in Betrieb, und die erreichte Geschwindigkeit muss 2 m/s betragen.

Ziele dieser Aufgabe sind die Bewegungsuntersuchung bei Änderung der Bewegungsrichtung des Roboters mit aktivem Kreiselgerät und die Bestimmung der 2D-Trajektorie der Roboterbewegung auf einer gleichmäßig horizontalen Oberfläche.

4. Der Roboter soll ein Hindernis (bspw. Stufe) überwinden. Die Höhe des Hindernisses beträgt bis zu 20 cm.

Der Zweck dieser Aufgabe ist die Prüfung der Möglichkeit des Roboters, kleinere Hindernisse mit der Hilfe des Kreiselgeräts zu überwinden.

5. Der Roboter soll über ein Hindernis (bis zu 15-20 cm hoch) springen. Für die Modellierung dieser Aufgabe ist das neue spezielle Modell entwickelt worden.

Der Zweck dieser Aufgabe ist die Prüfung des Sprungmechanismus.

Die Ergebnisse der Simulation der Aufgaben 1 und 2 sind in Bild 3.4 dargestellt. Es ist zweckmäßig, beide Ergebnisse in einem Bild darzustellen: Dadurch ist die Bewegungsweise des Roboters mit aktivem bzw. inaktivem Kreiselgerät vergleichbar. Der Roboter beschleunigt bis zu einer Geschwindigkeit von 2m/s. Das MATLAB-Modell verwendet folgende Parameter:

- Die Winkelgeschwindigkeit der Kreiselrotoren beträgt $\Omega = 30000 \text{ U/min}$ (die Notwendigkeit der Winkelgeschwindigkeit der Kreiselrotoren Ω wird in Kapitel 4 näher beschrieben).
- Die Winkelgeschwindigkeit der Kreiselrahmen beträgt $\omega = 0,16 \text{ s}^{-1}$ (1,5 U/min).
- Der Drehwinkel der Kreiselrahmen ist $\alpha = 40^\circ$.

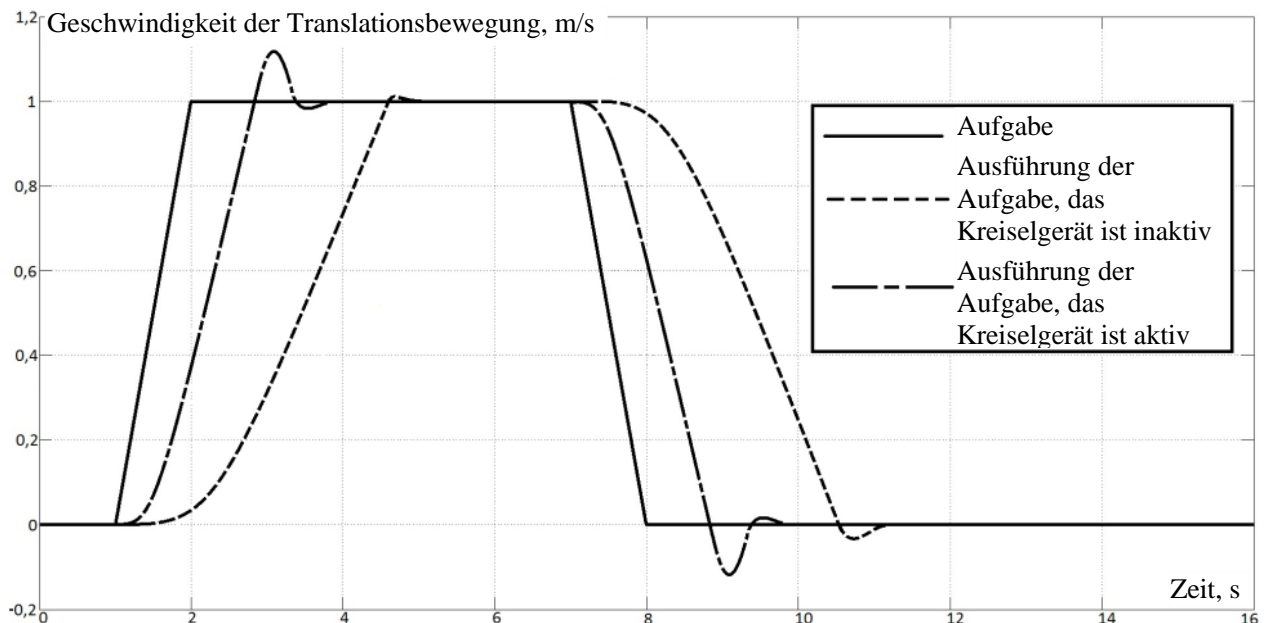


Bild 3.4: Veränderung der Geschwindigkeit und der Beschleunigung des Roboters beim Beschleunigen und Bremsen [91]

Laut Bild 3.4 ist die Zeit für die Beschleunigung und für die Bremsung des Roboters mit aktivem Kreiselgerät 1,5-mal geringer als bei Stillstand der Kreisel. Die Beschleunigung und die Bremsung des Roboters erhöhen sich jeweils im gleichen Verhältnis. Diese Ergebnisse korrelieren mit den Ergebnissen, die in der Schroll-Arbeit beschrieben sind.

Die Veränderung des Drehwinkels des Kreiselrahmens α , ist in Bild 3.5 dargestellt. Die durchgezogene Linie beschreibt den Sollwert für das Regelungssystem, während die gestrichelte Linie den Realwert des zu realisierenden Drehwinkels des Kreiselrahmens bezeichnet.

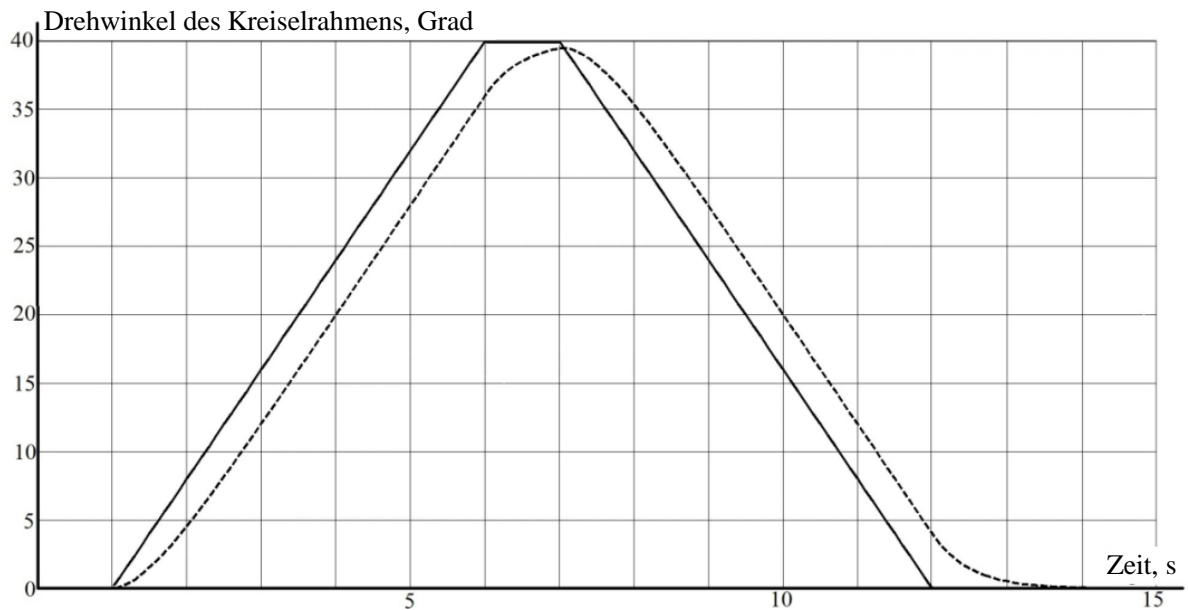


Bild 3.5: Veränderung des Drehwinkels des Kreiselrahmens

Laut Bild 3.5 kann die Nutzung der PID-Regler die Aufgabe des Rahmendrehwinkels exakt auszuführen.

Die Veränderung der Winkelgeschwindigkeit ω des Kreiselrahmens ist in Bild 3.6 dargestellt.

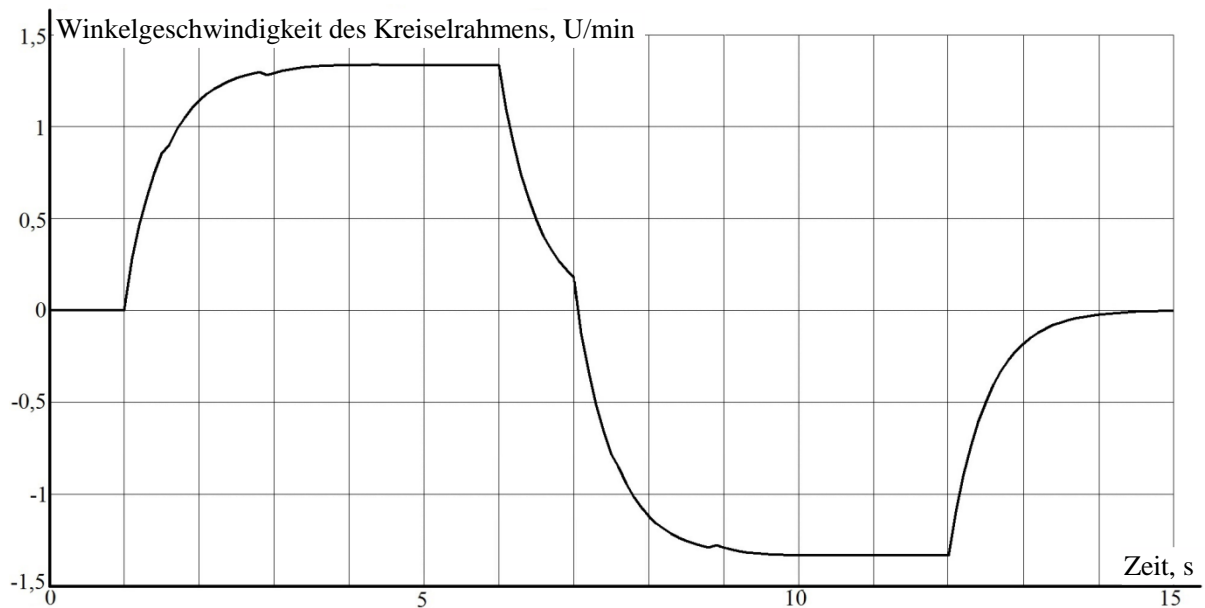


Bild 3.6: Veränderung der Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrahmens

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Entwicklung des notwendigen Kreiselmoments im entsprechenden MATLAB-Modell nicht durch die Rahmenwinkelgeschwindigkeit $\omega = \dot{\alpha}$, sondern durch den Rahmendrehwinkel α besser ist. Dieses Verfahren reduziert entsprechende Steuerungsalgorithmen und die jeweilige Modellstruktur. Anderenfalls sollten die „Limit-Stopp“-Blöcke für den Drehwinkel aus den sogenannten „grundlegenden“ Bibliotheken verwendet werden. Die Praxis des MATLAB-Simulink zeigt, dass ihre Anwendung zusammen mit den Blöcken aus den „höheren“ Bibliotheken zu einem starken Abfall der Geschwindigkeit der Modellierung führt. Das ist natürlich unerwünscht, da die Simulation möglichst in Echtzeit ablaufen soll. Das entwickelte Steuerungssystem hat folgende Aufgabe: Die Kreiselrahmen müssen auf dem Winkel α gedreht werden. Dann bestimmt das Steuerungssystem das Drehmoment und die Winkelgeschwindigkeit der Kreiselrahmen ω automatisch.

Laut Bild 3.6 ist die Winkelgeschwindigkeit für die Aufgabe 2 (siehe S. 67) relativ gering (1,5 U/min). Es muss darauf hingewiesen werden, dass das verwendete Steuerungssystem eine relativ große Reserve der Winkelgeschwindigkeiten des Rahmens ω hat. Das ermöglicht es bei der Modellierung, den hohen Wert der ω zu realisieren.

Beispielsweise ist bei $I = 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $\Omega = 3000 \text{ s}^{-1}$ (30000 U/min), beim Rahmendreiwinkel 45° ($\beta = 90^\circ - 45^\circ = 45^\circ$) und der Winkelgeschwindigkeit des Rahmens $\omega = 12 \text{ s}^{-1}$ (120 U/min) das Kreiselmoment $M = I \Omega \cdot \omega \sin \beta = 50 \text{ Nm}$. Das entsprechende Kreiselmoment für das Kreiselgerät (zwei Kreisel) ist dann 100 Nm .

Wichtig! Wenn der Roboter beschleunigt und die Kreiselrahmen stillstehen, aber sich beide Kreiselrotoren drehen, wird das Wellenmoment um die Rahmenachse laut der Formel (2.5) entwickelt. Das Schaubild des Moments ist in Bild 3.7 dargestellt, es ist nicht sehr hoch – über 1,5 Nm.

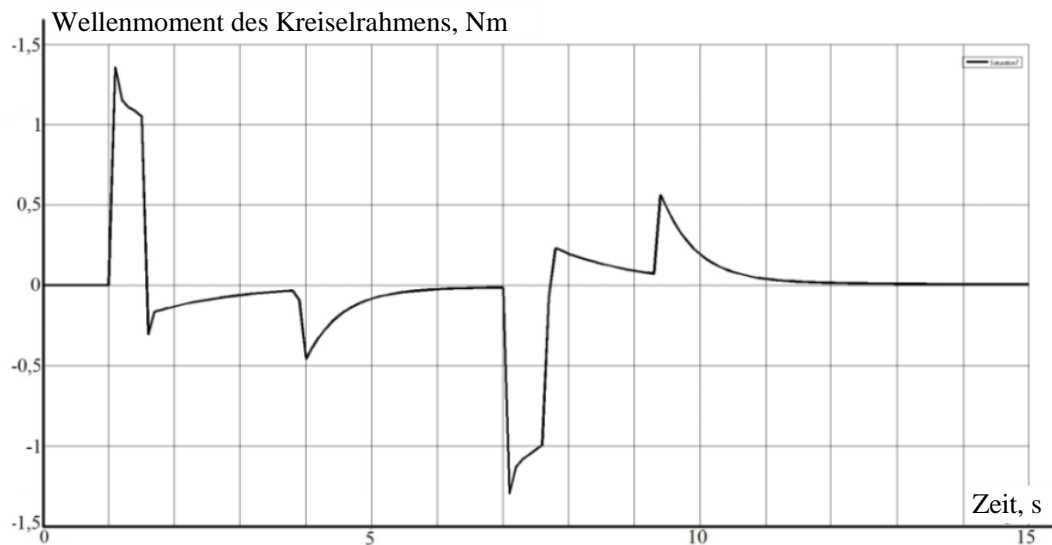


Bild 3.7: Veränderung des Wellenmoments des Kreiselrahmens, wenn dieser Rahmen bei der Roboterbeschleunigung stillsteht

Trotzdem kann das Steuerungssystem die Rahmen unbewegt lassen, aber durch den Ansprechverzug des PID-Reglers bewegen sich die Rahmen dennoch (sie drehen sich um den eigenen Winkel). Dieser Drehwinkel ist relativ klein: $\alpha \geq 3,5'$ (Bild 3.8).

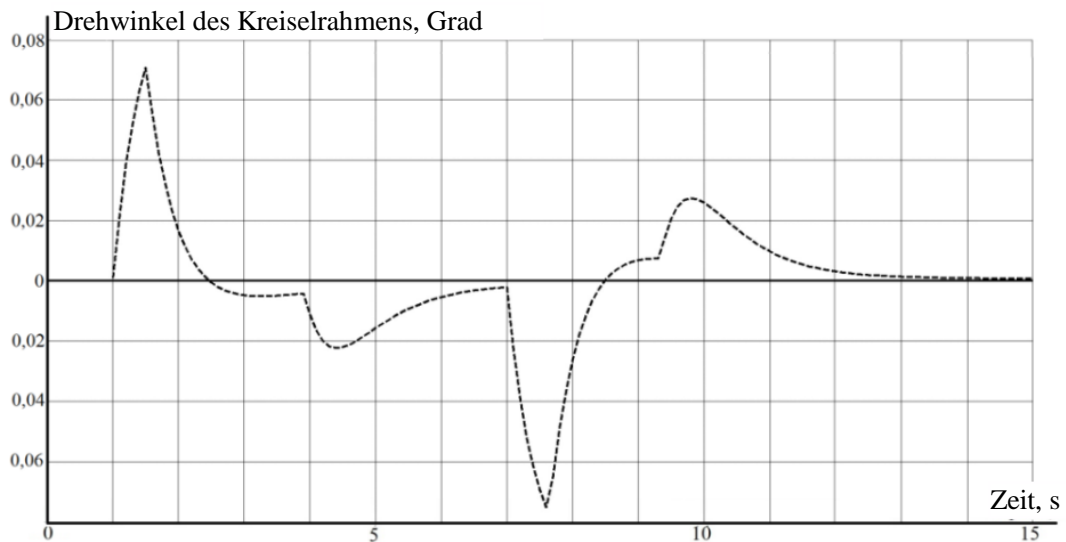


Bild 3.8: Drehwinkel des Kreiselrahmens bei Ansprechverzug des PID-Reglers

Die Ergebnisse der Aufgabe 3 (siehe S. 67) sind in Bild 3.9 dargestellt. Das ist die 2D-Trajektorie der Bewegung des Roboters auf der gleichmäßig horizontalen Oberfläche.

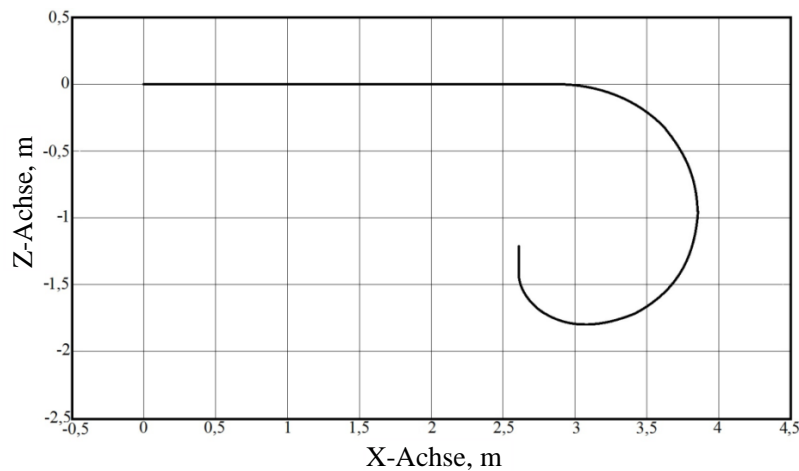


Bild 3.9: 2D-Trajektorie der Bewegung des Roboters

Der Roboter beschleunigt auf eine Geschwindigkeit von $V=2$ m/s. Das Kreiselgerät ist aktiv und entwickelt ein Hilfsmoment. Im Zeitpunkt $t_1 = 5$ s dreht sich das sphärische Pendel (mit dem Kreiselgerät) um die Achse X (Bild 2.5) mit dem Winkel von 25° ($\beta = 90^\circ - 25^\circ = 65^\circ$) und der Winkelgeschwindigkeit $\omega_1 = 2$ U/min. Im Zeitpunkt $t_2 = 10$ s beginnt das Pendel das Rückdrehen mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit $\omega_2 = \omega_1$. Der entsprechende Drehwinkel des Pendels ist in Bild 3.10 dargestellt. Das Bild 3.11 zeigt die Winkelgeschwindigkeit der Pendelumdrehung.

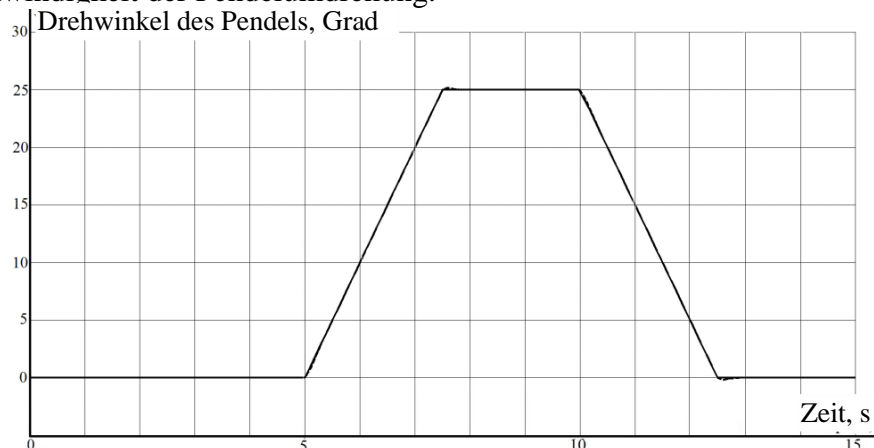


Bild 3.10: Drehwinkel des Pendels um die Achse X (Bild 2.5), abhängig von der Zeit

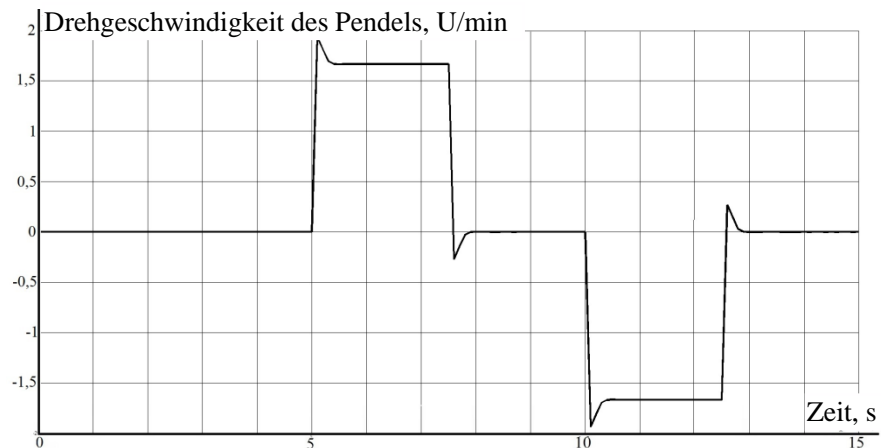


Bild 3.11: Drehgeschwindigkeit des Pendels, abhängig von der Zeit

Die 2D-Trajektorie des Roboters (Bild 3.9) beweist Folgendes. Der Roboter kann die Bewegungsrichtung ändern und auf einer 4 m^2 -Fläche eine Wendung ausführen. Die Winkelgeschwindigkeit der Pendelumdrehung ω_1 ist relativ gering und überschreitet den Wert von 2 U/min nicht.

Die 3D-Visualisierung der Simulation der Aufgabe 4 (siehe S. 68) ist in Bild 3.12 dargestellt. Der Kugelroboter bewegt sich für die Reduzierung und Zeitverkürzung des Simulationsprozesses in der Ebene S (Bild 2.1). Die Höhe der Stufe beträgt hierbei $0,12 \text{ m}$, und die Winkelgeschwindigkeit der Rahmenumdrehung ist gleich $\omega = 12 \text{ s}^{-1}$ (120 U/min).

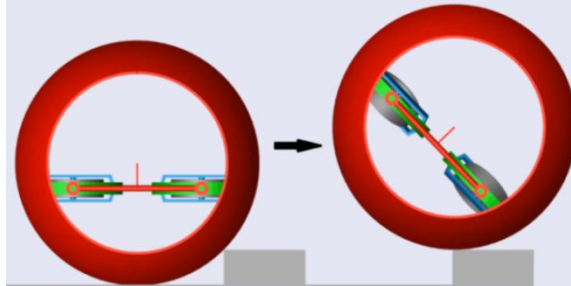


Bild 3.12: Roboter überwindet die Stufe

Das Antriebsmoment für die Rahmendung ist in Bild 3.13 dargestellt. Das Bild 3.14 zeigt den Drehwinkel dieses Rahmens in der Abhängigkeit von der Zeit. In Bild 3.15 ist die Veränderung der Winkelgeschwindigkeit der Rahmenumdrehung dargestellt.

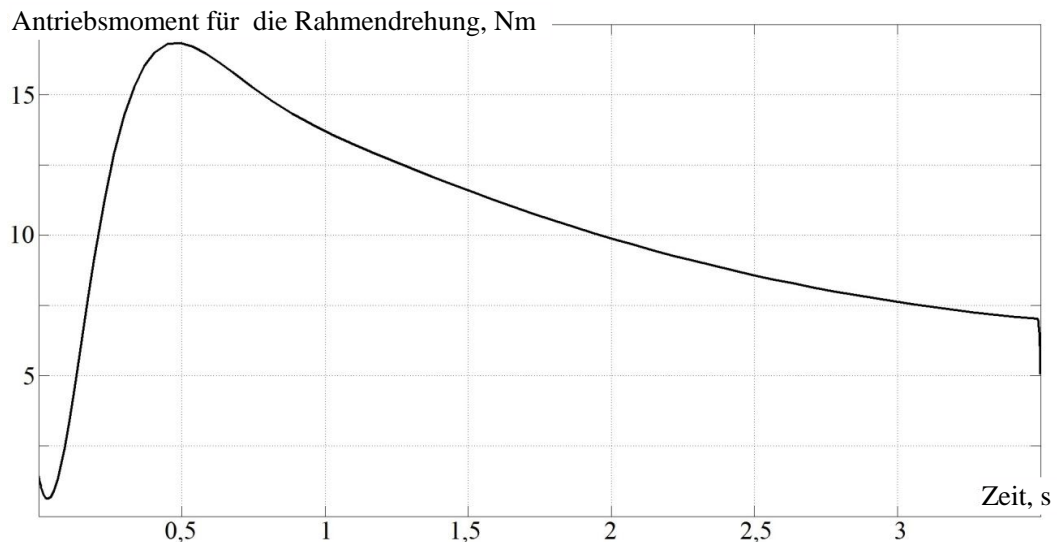


Bild 3.13: Veränderung des Antriebsmoments für die Rahmendung

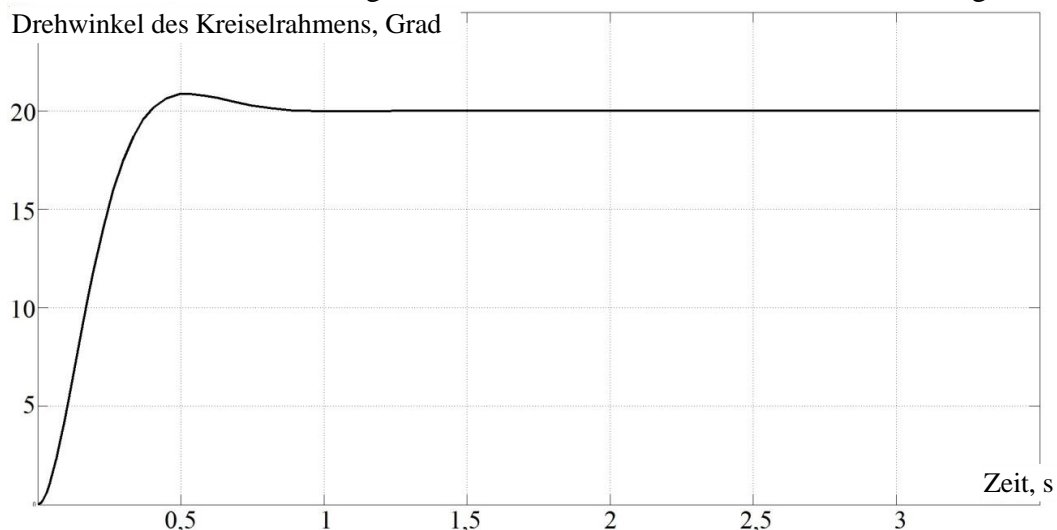


Bild 3.14: Veränderung des Drehwinkels des Kreisrahmens

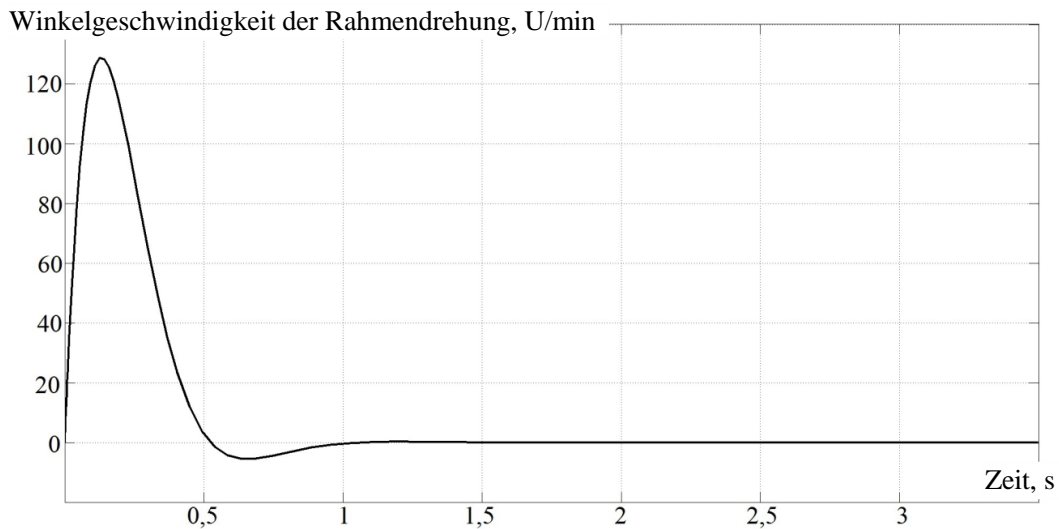


Bild 3.15: Veränderung der Winkelgeschwindigkeit der Rahmendrehung

Aus Bild 3.13 kann entnommen werden, dass das Antriebsmoment des Rahmens einen Höchstwert von 17 Nm im Zeitpunkt 0,5 s erreicht. Es ist offensichtlich, dass Motoren mit einem großen Anhaltmoment für diese Antriebe verwendet werden sollten. Beispielsweise können die Gleichstrommotoren von MAXON (DC-Serie) diese Bedingungen erfüllen.

Das Bild 3.14 zeigt, dass der Umdrehwinkel des Kreisrahmens 20° erreichen kann, wobei seine Winkelgeschwindigkeit bis zu $\omega = 13 \text{ s}^{-1}$ (130 U/min) erreicht. Diese Geschwindigkeit erhöht sich um einen geringen Wert, dessen Grenze bei 12 U/min liegt (siehe Bild 3.15). Diese Werte sind bei der Modellierung des Roboters jeweils verwendet worden.

Die Ergebnisse der Modellierung der Aufgabe 5 (siehe S. 68) sind in Bild 3.16 dargestellt. Die erreichte Höhe des Robotersprungs ist bei der Überwindung des Hindernisses geringer als die theoretische Höhe (0,2 m statt 0,45 m), weil der Schlag in dieser Modellierung nicht vollständig elastisch ist.

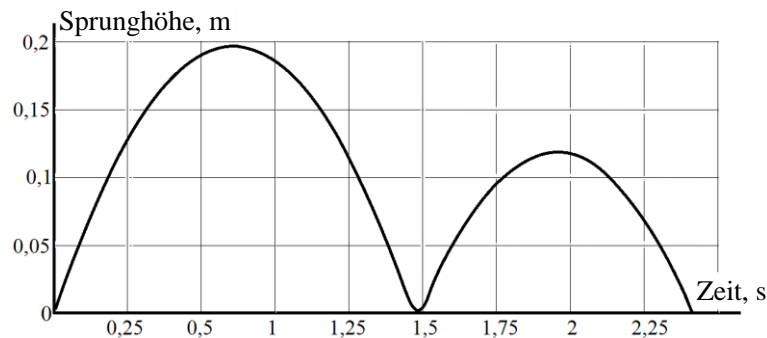


Bild 3.16: Sprunghöhe des Roboters

Durch die Modellierung des Roboters wird festgestellt, dass die gewählten Werte der Massenträgheitscharakteristika der Roboterelemente den Roboter alle notwendigen Aufgaben ausführen lassen.

3.4. Antriebsmomente der Roboterelemente

Aus dem Zusammenwirken der Roboterelemente und der Steuerung (siehe Schema in Bild. 3.1) soll der entwickelte Kugelroboter für die Bewegung mit folgenden Antrieben ausgestattet sein:

- Antrieb der Hauptbewegung
- Antrieb der Änderung der Hauptbewegungsrichtung, der auch einen Antrieb der Pendeldrehung um die Y-Achse bewirkt (siehe das Bild 2.5)
- Antrieb der Kreisrahmen
- Antrieb des Zugsystems für den Sprungmechanismus (Bild 2.2)

3.4.1. Antrieb der Hauptbewegung des Roboters

Ein wichtiger Wert bei der Entwicklung des Roboters ist das Kraftmoment auf der Welle des Hauptbewegungsantriebs. Das Steuersystem entwickelt automatisch den Momentwert, der für die Umstellung des Roboters mit einer Geschwindigkeit V notwendig ist. Die Veränderung des Moments ist in Bild 3.17 dargestellt. Wenn der Roboter die geradlinige Bewegung mit der Beschleunigung bis zum Sollwert der Geschwindigkeit (2 m/s) erreicht, kann er mit dieser Geschwindigkeit eine gleichmäßige Bewegung ausführen und danach durch eine Bremsung zum Stillstand kommen. Die durchgezogene Linie in Bild 3.17 entspricht der Veränderung des Kraftmoments, wenn das Kreiselgerät inaktiv ist. Die gestrichelte Linie in Bild 3.17 entspricht dem Kraftmoment bei aktivem Kreiselgerät.

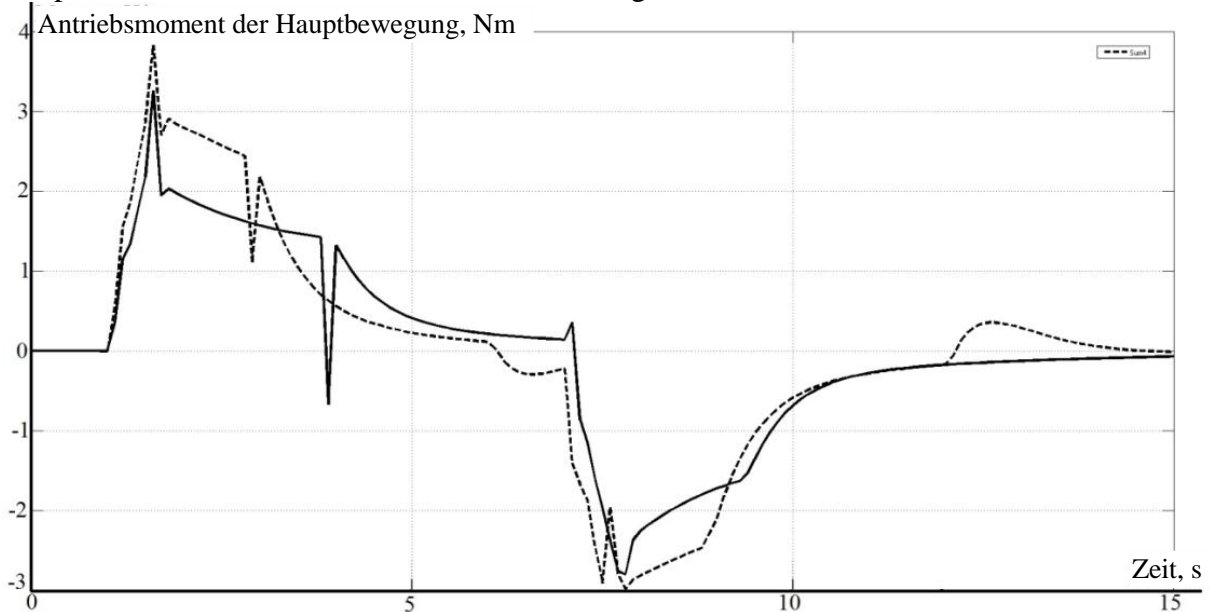


Bild 3.17: Veränderung des Antriebsmoments der Hauptbewegung

Das Kraftmoment des Hauptbewegungsantriebs steigt bis zu 4,0 Nm. Dem kinematischen Schema des Roboters (siehe Bild 2.5) kann entnommen werden, dass der Roboter zwei Halbachsen für den Hauptbewegungsantrieb haben soll. Dadurch soll ein Kraftmoment über 2,0 Nm um jede Achse entwickelt werden.

Die Bewegung des Roboters ist relativ langsam. Daher können Motoren verwendet werden, die mit dem Schneckenreduziergetriebe ausgerüstet sind. Solche Getriebe haben eine relativ hohe Getriebezahl (bis 25-35) und sind *selbstgebremst*. Diese Eigenschaft ist wichtig für die Realisierung der Möglichkeit des Roboters, Hindernisse überwinden zu können. Die Normmodelle solcher Getriebe sind jedoch nicht kompakt genug. Deshalb soll ein Sondergetriebe mit der Getriebezahl 25-35 und dem notwendigen Moment (bis 3,0 Nm) entwickelt werden. Für solche Getriebezahlen wird das Kraftmoment für jede Halbachse des Antriebs über 0,1 Nm erreichen. Beispielsweise sind die MAXON-Motoren aus der Serie RE-35 für diese Werte geeignet.

3.4.2. Antrieb der Kreiselrahmen

Die Entwicklung des Kreiselmoments im Roboter ist nicht nur für die Überwindung von Hindernissen notwendig, sondern auch für die größere Beschleunigung des Roboters, (wie in der Aufgabe 2, siehe S. 67). Damit sich die Kreiselrahmen drehen, muss natürlich der entsprechende Antriebsmotor ein notwendiges Kraftmoment entwickeln. Wenn das Kreiselgerät die Beschleunigung des Roboters erhöht, dann wird das Kraftmoment des Kreiselrahmenantriebs geringer, als es für die Überwindung des Hindernisses (Stufe) notwendig ist. Dieses in der Modellierung entwickelte Antriebsmoment (für Aufgabe 2) ist in Bild 3.18 dargestellt.

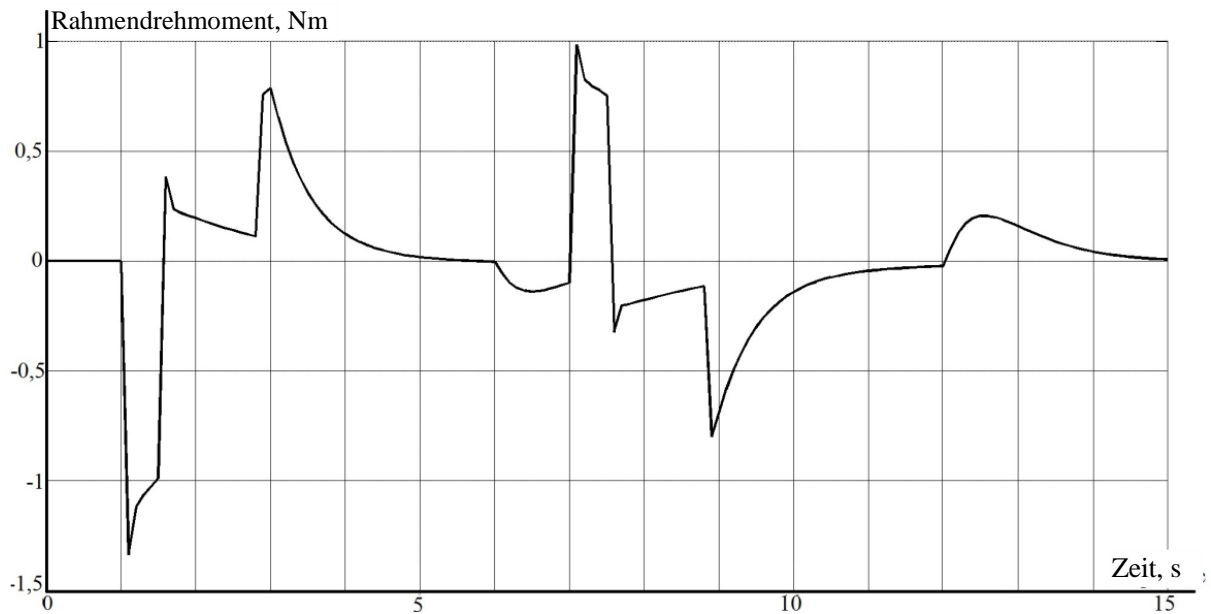


Bild 3.18: Veränderung des Rahmendrehmoments

Das Antriebsmoment steigt um dem Wert von $1,5 Nm$. Dieser Wert ist relativ klein im Vergleich zum Höchstmoment ($17 Nm$), das für ein Überwinden der Stufe mit Hilfe des Kreiselgeräts (Aufgabe 4) notwendig ist.

Es sei jedoch angemerkt, dass die DC-Motoren ein sehr hohes Anhaltmoment haben, das das Nennmoment wesentlich übersteigt. Beispielsweise kann der Motor MAXON RE-40 kurzzeitig beim Start ein Moment von bis zu $2,56 Nm$ entwickeln (das Nennmoment ist $M_{Nenn} = 0,17 Nm$), dabei soll er die Stromstärke von $42,4 A$ erreichen. Die Controller, die für solche Motoren die entsprechende Stromstärke entwickeln können, sind normalerweise mindestens $10 \times 10 cm$ groß und schwer. Beispielsweise sind kleinere Controller $5 \times 5 cm$ groß und entwickeln einen Nennstrom von 7 bis zu $9 A$, wobei sie einen kurzzeitigen Anhaltstrom von bis zu $16 A$ über eine Zeit von $0,8 - 1,5 s$ erreichen können.

Für den Antrieb der Kreiselrahmen sollten die Motoren beziehungsweise die Getriebe nach der Größe des erkannten Anhaltmoments bei einer Stromstärke über $16 A$ und nach der Geschwindigkeit der Rahmendrehung $\omega = 12 s^{-1}$ ($120 U/min$) ausgewählt werden. Unter diesen Bedingungen kann der Motor MAXON RE-40-148867 verwendet werden. Er hat ein Nennmoment von $M_{Nenn} = 0,17 Nm$ bei einem Nennstrom von $6 A$ und einem Anhaltmoment vom $M_{Anh} = 0,453 Nm$ bei einem Anhaltstrom von $16 A$.

Der Motor soll mit zwei aufeinanderfolgenden Getrieben ausgerüstet werden. Das sind:

- das Planetargetriebe MAXON GP-52 mit der Getriebezahl $i = 21$
- das Differentialkegelgetriebe mit der Getriebezahl $i = 3$

Mit Hilfe des Differentialkegelgetriebes kann der Motor beide Kreiselrahmen des Kreiselgeräts (siehe Bild 2.5) treiben.

Mit diesen beiden Getrieben ist die Gesamtgetriebezahl $i = 63$, und das Gesamtkraftmoment soll beim Anhaltstrom $16 A$ bis zu $28 Nm$ erreichen. Dadurch beträgt das Antriebsmoment für die einzelnen Kreiselrahmen jeweils $14 Nm$. Dieser Wert ist vergleichbar mit dem Kraftmoment, das für die Überwindung der Stufe (siehe Aufgabe 4, S. 68) benötigt wird ($17 Nm$, siehe Bild 3.13). Um die geforderten $17 Nm$ zu erreichen, sind jedoch ein schwerer Controller oder ein größerer Motor notwendig. Es gibt auch keine Möglichkeit, ein Getriebe mit einer größeren Getriebezahl zu verwenden, weil die Drehzahlen der DC-Motoren der

Serien RE-30, 40 und 50 im Bereich 8000 ± 500 U/min liegen. Aus diesem Grund wird der Motor RE-40 verwendet.

Wenn der Stromwert 6 A (Nennstrom) ist, dann erreicht das Antriebsmoment für die einzelnen Kreisrahmen 5,35 Nm. Dieser Wert reicht aus, um die Beschleunigung des Roboters zu erhöhen (siehe Aufgabe 2, S. 67).

3.4.3. Antrieb der Änderung der Hauptbewegungsrichtung

Die Veränderung des Kraftmoments des Antriebs der Änderung der Hauptbewegungsrichtung ist im folgenden Bild 3.19 dargestellt. Dieses Kraftmoment führt zu einer Pendeldrehung um die X-Achse (siehe Bild 2.5) und entspricht der Aufgabe 3 (siehe S. 68).

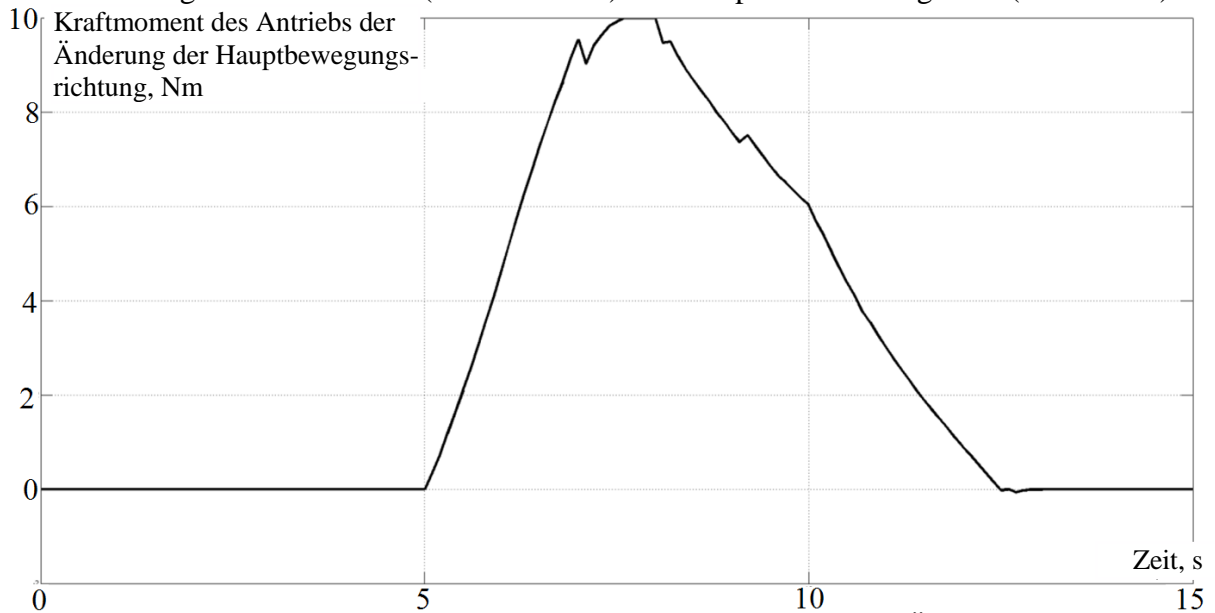


Bild 3.19: Veränderung des Kraftmoments des Antriebs der Änderung der Hauptbewegungsrichtung

Das Kraftmoment des Antriebs der Änderung der Hauptbewegungsrichtung erreicht hierbei $10,0 \text{ Nm}$. Der Antrieb der Änderung der Bewegungsrichtung kann wie der Hauptbewegungsantrieb mit einem Schneckengetriebe und mit dem Motor MAXON RE-35 ausgerüstet werden. Aber dieses Getriebe muss eine höhere Getriebezahl haben.

3.4.4. Antrieb des Zugsystems des Sprungmechanismus

Die Gesamtfederzahl des Zugsystems und die Federverlängerung sollen die geforderte Sprunghöhe des Roboters sicherstellen, damit er Hindernisse bis zu 0,30 m überwinden kann. Aber durch die Dimensionierung des Roboters kann die Verlängerung der Feder nicht mehr als 0,15 m betragen. Deshalb ist die Feder der Firma GUTEKUNST (Z-162OX-1 Serie) mit der Federzahl 3 kN/m und der maximalen Verformung $x = \Delta L = L_N - L_0 = (0,10 - 0,12) \text{ m}$ (Bild 3.20) gewählt worden.

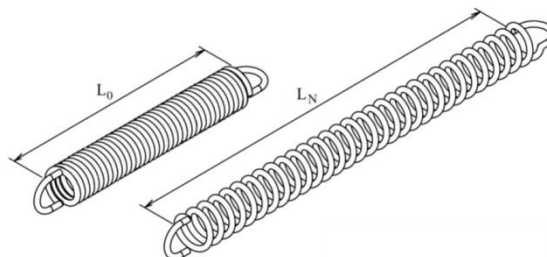


Bild 3.20: Feder des Sprungmechanismus

Nach dem kinematischen Schema des Roboters (Bild 2.5) braucht der Sprungmechanismus für die notwendige Sprunghöhe vier dieser ausgewählten Federn. Diese sind paarweise angeordnet. Jedes Paar ist mit einem separaten Zugsystem ausgerüstet und hat ein Schraubgetriebe, um die Federn zu spannen.

Um die Masse des Roboters gering zu halten, sind die Muttern der verwendeten Schraubgetriebe nicht aus Bronze, sondern aus Kunststoff hergestellt. Der Gewindetrieb der Firma IGUS hat eine Stahlschraube mit einem Trapezgewinde und einer Kunststoffmutter. Diese Schraube hat das Gewindeprofil TR 10-2, wobei die Mutter aus dem Kunststoff JFRM 25-25 hergestellt ist. Die Traglast des Getriebes ist $Q = 1 \text{ KN}$.

Das notwendige Drehmoment, das der Kraft $Q = 1 \text{ KN}$ entspricht, kann aus der Formel [92] entnommen werden:

$$M_{Dr} = Q \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\beta + \rho).$$

d_2 – Flankendurchmesser des Trapezgewindes der Schraube

β – Steigungswinkel des Gewindes

ρ – Reibungswinkel

Bei $d_2 = 0,009 \text{ m}$, $\beta = 7^\circ$, $\rho = 5^\circ 43''$ (Reibungskoeffizient des Gewindes $f = 0,1$) ist das notwendige Drehmoment $M_{Dr} = 1 \text{ Nm}$. Um diesen Wert des Kraftmoments zu erreichen, kann der Motor MAXON RE-35 mit einem Schneckengetriebe verwendet werden (genauso wie beim Hauptbewegungsantrieb).

3.5. Antriebsauswahl nach benötigten Parametern

Die Auswahl der Motoren für den Roboter ist durch die in der MATLAB-Simulation erreichten Werte der Antriebsmomente der Roboter-elemente gewährleistet. Zudem ist die Auswahl der Motoren mit einer Reserve von 20-25% der jeweils entwickelten Momente getroffen worden, das ist aber nicht immer möglich für die Antriebe des entwickelten Roboters.

Die Wechselstrommotoren haben hohe Betriebscharakteristika. Aber die existierenden Modelle der Controller gewährleisten die Steuerung solcher Motoren nach der Geschwindigkeit nicht. Beispielsweise ist die schnelle Beschleunigung der Motoren bis zu den geforderten Geschwindigkeiten nicht möglich.

Um nicht zusätzlich einen Sonderkontroller entwickeln zu müssen, sind die Gleichstrommotoren (DC-Motoren) gewählt worden. In der Tabelle 3.2 sind die Hauptcharakteristika der gewählten Motoren der Firma MAXON vorgestellt. Notwendig ist es anzumerken, dass der Motor RE-35-273754 für den Antrieb der Feststelleinheit des Sprungmechanismus ebenfalls verwendet wird. Die Motoren für die Kreiselrotorantriebe werden im Kapitel 4 (bei der Entwicklung des Kreiselgeräts) ausgewählt.

№	Motor	Mechanismus, der angetrieben wird	Spannung, V	Strom, A		Kraftmoment, Hm	
				Anhalte- moment	Nenn- moment	Anhalte- moment	Nenn- moment
1	RE 40 148867, 150 Watt	Antrieb der Kreiselrahmen (×1).	24	16	6	0,484	0,17
2	RE 35 273754, 100 Watt	Hauptbewegungsantrieb (×2); Antrieb der Änderung der Hauptbewegungsrichtung (×2); Antrieb des Zugsystems des Sprungmechanismus (×2); Antrieb der Feststelleinheit des Sprungmechanismus (×1).	24	16	3,62	0,84	0,1

Tabelle 3.2: Baugruppen und Antriebe

Insgesamt werden also 8 Motoren benötigt.

3.6. Elektronik und Akkus des Roboters

Jeder Motor soll mit einem Encoder (einem Kodierer) für die Kontrolle der Winkelgeschwindigkeit der Motorwelle und der Lage des damit angetriebenen Mechanismus ausgerüstet sein [86]. Für diese Sensoren werden die entsprechenden Endschalter positioniert.

Für die Kreiselrahmen werden drei Endschalter benötigt: einer für die Position der horizontalen Lage der Rahmen und zwei für das kontrollierte Ende des Rahmendrehs. Diese Kontrolle ist für den möglichen Bruch der Kommunikation des Kreiselrotorantriebs notwendig. *Das sind die Schalter 5.1 und 5.2 in Bild 3.21.*

Für das Kippen des sphärischen Pendels, wenn der Roboter die Richtung der Hauptbewegung ändert, werden zwei Schalter benötigt. Sie begrenzen den Kippwinkel des Pendels, wenn dieser geneigt ist. *Das sind die Schalter 4.1 und 4.2 in Bild 3.21.*

Für die runde äquatoriale Führung werden sechs Schalter benötigt: vier auf den Enden der zwei Führungen und zwei in ihrer Mitte. Diese Schalter sind für die Position des Pendels notwendig, damit dieses sich um die senkrechte Y-Achse dreht. *Das sind die Schalter 3.0, 3.1, und 3.2 in Bild 3.21.*

Für die linearen Führungen des Zugsystems des Sprungmechanismus werden vier Schalter benötigt: zwei für jedes Paar der Führungen. Sie sind für die Kontrolle der oberen und unteren Lage der äquatorialen Führung notwendig (siehe Bild 2.2). *Das sind die Schalter 1.1, 1.2, 2.1, 2.2 in Bild 3.21.*

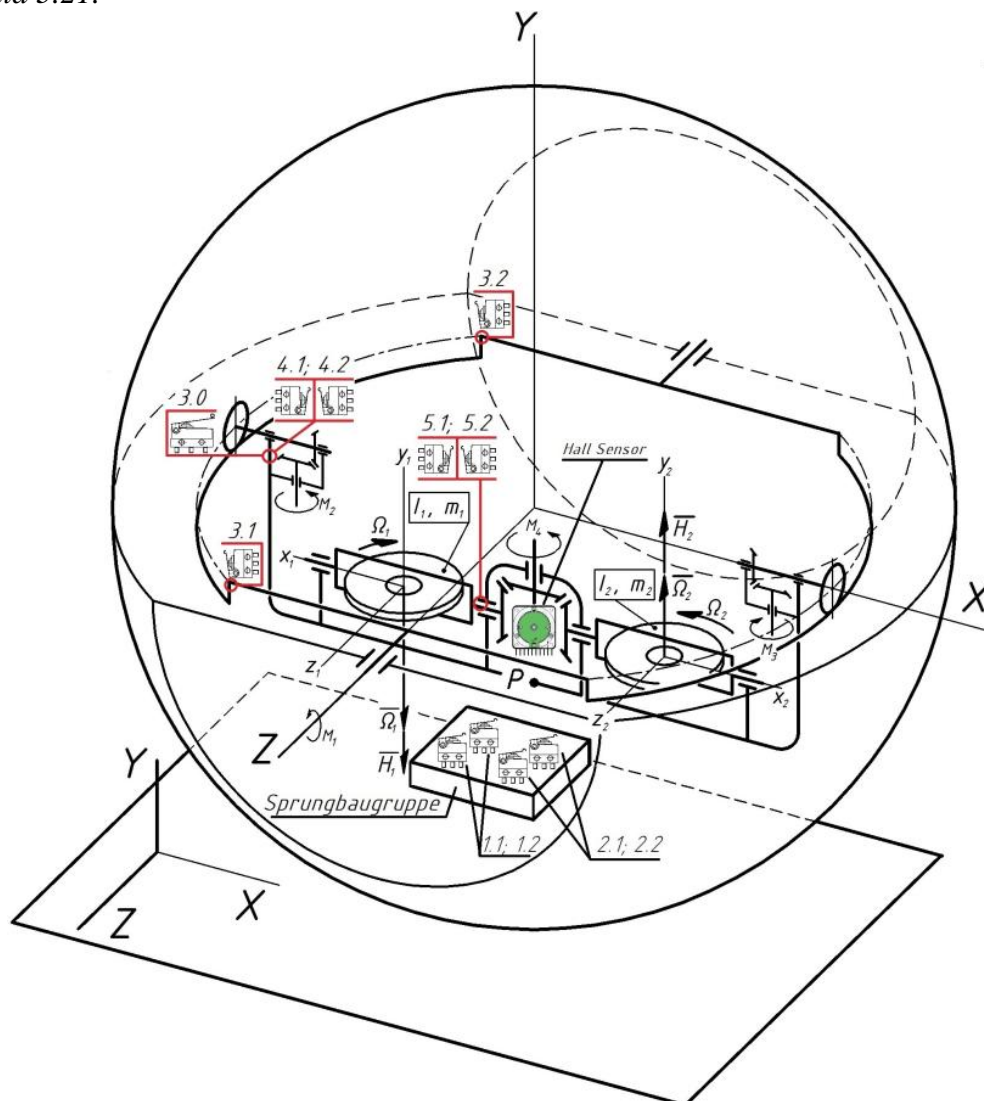


Bild 3.21: Endschalter des Roboters

3.6.1. Auswahl der Controller

Die Stromstärke kann für die gewählten Motoren von 3 bis 16 Ampere reichen. Der höchste Wert (16 A) ist ein Anhaltstrom, der nur über relativ kurze Zeit (nicht mehr als 0,8 s) realisiert wird, was für den Verwendungszweck des entwickelten Roboters ausreicht.

Bei der Auswahl der Controller ist es wichtig, nicht nur die Stromstärke, sondern auch die Controllergröße zu berücksichtigen. Für den entwickelten Roboter wird die Serie SC 5008S der Firma Faulhaber verwendet. Die Modelle der Controller dieser Serie werden sowohl für DC- als auch für die EC-Motoren verwendet. Der Controller und seine Größe sind in Bild 3.22 dargestellt.

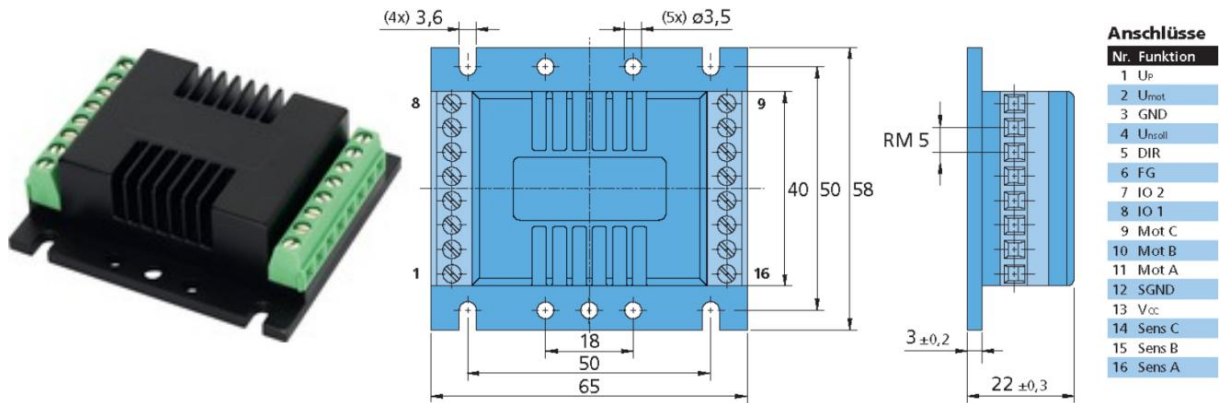


Bild 3.22: Controller Faulhaber Serie SC 5008S

Das Schema der Elektronik des Roboters ist in Bild 3.23 dargestellt.

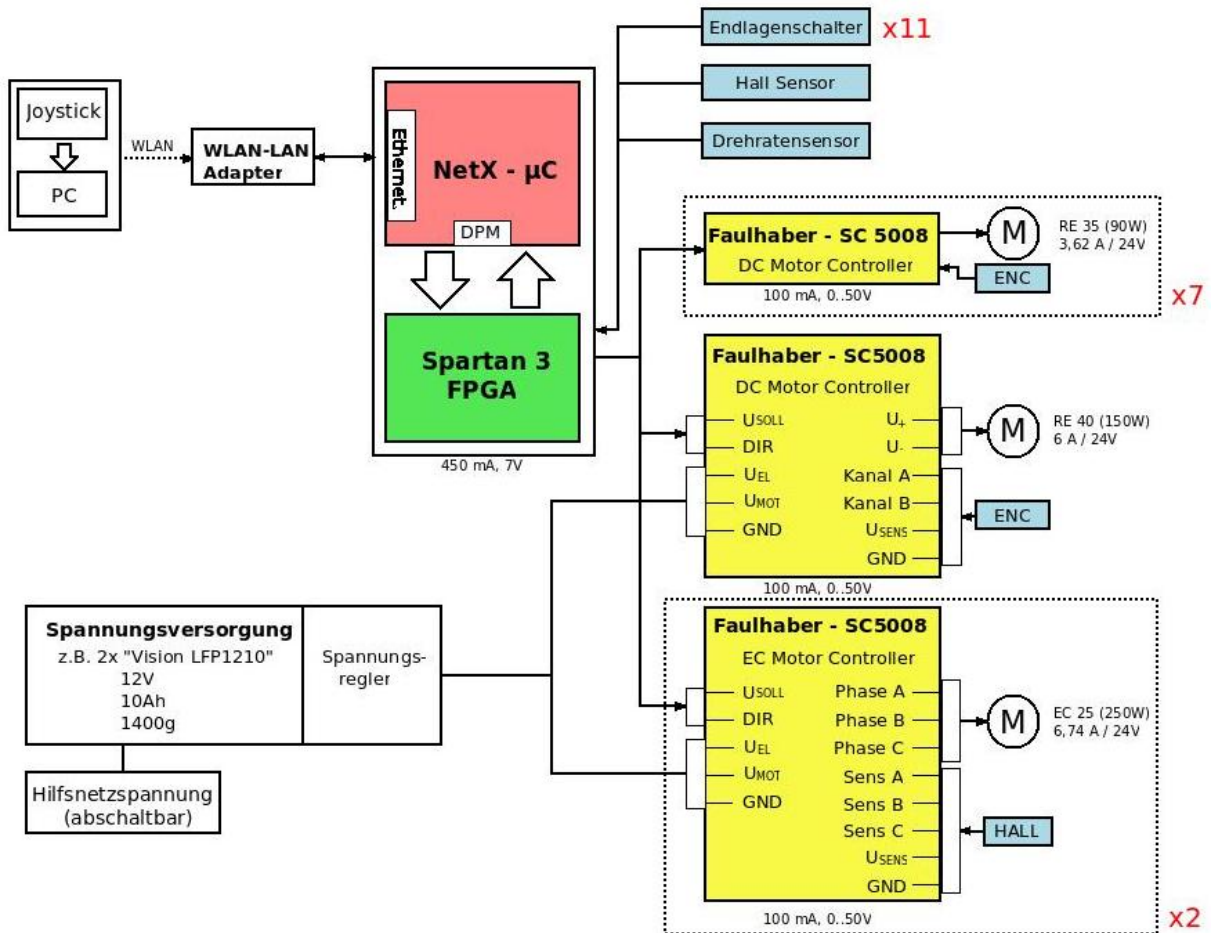


Bild 3.23: Elektronik des Roboters

In Bild 3.23 kann ist erkennbar, dass der Roboter mit acht Controllern für DC-Motoren und mit zwei Controllern für EC-Motoren ausgerüstet ist. Die DC-Motoren treiben alle Roboterelemente an, wobei die Kreiselrotoren von den EC-Motoren bewegt werden.

Der Roboter ist über NetX und Spartan 3 FPGA gesteuert und mit einem WLAN-LAN-Modul ausgerüstet. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit der Fernbedienung des Roboters (z.B. mit Funkgerät und Joystick).

Kompakte Li-Fe-Po-Akkus werden von der Firma VISION hergestellt (Bild 3.24). Die Masse des Akkus beträgt 0,8 kg, die Kapazität liegt bei 4,5 Amperestunden (Ah). Bei diesem Akku stehen die Werte Größe, Masse und Kapazität in einem guten Verhältnis. Deswegen ist der Roboter mit zwei solcher Akkus ausgerüstet. Beide Akkus befinden sich auf dem sphärischen Pendel.



Bild 3.24: VISION-Akku

4. ENDVERGLEICH DER ROBOTER

Das vierte Kapitel beschreibt den Entwicklungsprozess der Roboterkonstruktion. Nach dem kinematischen Schema (siehe Bild 2.5) und den Anforderungen an die Mechanismen und Antriebe des Roboters (siehe Kap. 3) werden die Elemente und Baugruppen des Kugelroboters (Kreiselgerät, Hüllkugel u.a.) konstruiert. Abschließend wird dann die Gesamtkonstruktion des Roboters entwickelt.

4.1. Werkstoffe und Massen der Roboter-elemente

Die Konstruktionswerkstoffe des allgemeinen Maschinenbaus (unlegierter Stahl und Edelstahl) können bei mobilen Robotern nicht eingesetzt werden, weil sehr leichte und robuste Teile im Roboter verwendet werden müssen. Eben deshalb werden zahlreiche Aluminium- und Titanlegierungen im Bereich des Roboterbaus angewendet. Zahlreiche Teile werden aus Kohlenstofffasern (CFK) hergestellt.

Dadurch soll der Roboter möglichst wenige Stahlteile haben. Trotzdem sollten die wichtigsten am höchsten belasteten Komponenten des Roboters (z. B. die Kreiselrotoren) aus Edelstahl hergestellt werden. Weil dieser Werkstoff ein hohes Gewicht hat, sollen möglichst wenige Teile des Roboters aus ihm hergestellt werden.

Relativ hohe Anforderungen an die Geländefähigkeit und die Tragfähigkeit, z.B. eine Gewichtsgrenze des entwickelten Roboters, bedürfen einer optimalen Kombination des Körperdurchmessers mit dem Gesamtgewicht. Bereits gebaute Kugelroboter in der Größe 50 cm [31,41] haben eine Masse von 20 bis 25 kg. Durch die breite Verwendung von Kohlefaser-Verbundwerkstoffen kann der entwickelte Roboter sogar eine Masse von 20 kg unterschreiten.

Für den entwickelten Roboter ist der Parameterschätzwert der Masse seiner Elemente unter Berücksichtigung der Minimierung seines Gewichts erfüllt. Nach Möglichkeit sind leichte Materialien zu verwenden: Aluminiumlegierungen und der Verbundwerkstoff CFK.

- Kreiselgerät: Die Masse der Hauptelemente des einaxialen Kreisels (Körper, Rahmen, Motor, Lager usw.) überschreitet die Masse seines Kreiselrotors etwa fünf- bis sechsmal. Dieses Gesetz trifft für die Mehrheit der einaxialen Gyroskope und auch für den Schlickkreisel zu. Es ist zudem nötig, ein Beispiel der entwickelten sphärischen Roboter zu berücksichtigen, die mit den Gyroskopen ausgerüstet sind. Ein Beispiel ist der Schroll-Roboter [31]: der äußere Durchmesser seines Kugelgehäuses beträgt 0,46 m, die Masse jedes Kreiselrotors 1,0 kg und der Durchmesser des Rotors 0,1 m. Danach wird der Durchmesser des Kugelgehäuses des entwickelten Roboters 0,5 m betragen. Unter der Berücksichtigung der existierenden Konstruktionen der einaxialen Gyroskope ist der Durchmesser des Kreiselrotors 0,1 m, seine Masse ist dann ungefähr 0,7 kg. Also kann die Masse aller anderen Elemente des Kreiselgeräts maximal 3,5-4,2 kg betragen. Die Anwendung von CFK statt Stahl kann die Masse dieser Elemente etwa um das Doppelte verringern. Also ist die Masse jedes Kreisels $2 \pm 0,2$ kg. Folglich beträgt die Gesamtmasse des Kreiselgeräts ungefähr 5,0 kg.
- Akkus: Das gewählte Modell (die VISION-Akku, Li-Fe-Po-4,5) hat eine Masse 1,5 kg, also erreicht die Gesamtmasse für beide Akkus 3,0 kg.
- Steuerung und Leistungselektronik: Mit den gewählten Controllern und den jeweiligen Tragplatten beträgt die gesamte Masse für diese Baugruppe ungefähr 2,5 kg.
- Pendeltragwerk: Dieses Tragwerk soll aus CFK hergestellt werden und eine Gesamtmasse von 1,5 bis 2,0 kg haben.

Danach müsste die gesamte Masse aller dieser Roboter-elemente (Kreiselgerät, Akkus, Elektronik und Pendeltragwerk) 12,0 – 12,5 kg betragen.

Andere Elemente:

äquatoriale Führung: Für dieses Element gibt es noch keine entwickelten Beispiele/Analogien, dadurch ist es schwierig, seine Masse zu kalkulieren. Daher kann diese relativ stark variieren (1,5 – 2,5 kg).

Sprungmechanismus: Beim Roboter „KisBot“ [35] beträgt die Masse dieses Mechanismus beispielsweise bis zu 3,0 kg.

Kugelgehäuse des Roboters: Es besteht aus einer 1mm dicken Gummischicht und zwei CFK-Seitendeckeln. Die Gesamtmasse kann 2,0 – 2,5 kg erreichen.

Dann muss die gesamte Masse der drei letztgenannten Roboterelemente (äquatoriale Führung, Sprungmechanismus und Kugelgehäuse) 6,5 – 8,0 kg betragen.

Dadurch erreicht die Masse des gesamten Roboters 18,5 – 20,5 kg.

4.2. Kreiselgerät und sphärisches Pendel

Das sphärische Pendel besteht aus den folgenden Hauptelementen:

- Kreiselgerät
- Akkus
- Controller
- Tragwerk, das alle Elemente des Pendels verbindet

Die Akkus und die Controller sind bereits gewählt worden. Die mechanische Konstruktion des Kreiselgeräts und des Tragwerks sollen noch entwickelt werden.

4.2.1. Kreiselgerät

Das Kreiselgerät muss sehr kompakt und leicht sein. Zugleich muss das vom Gerät entwickelte Kreismoment möglichst hoch sein.

Die Hauptbauarten der verwendeten Kreisel sind in Bild 4.1 dargestellt. Alle diese Mechanismen sind mit Außenläufermotoren ausgerüstet, die den Kreiselrotor direkt bewegen.

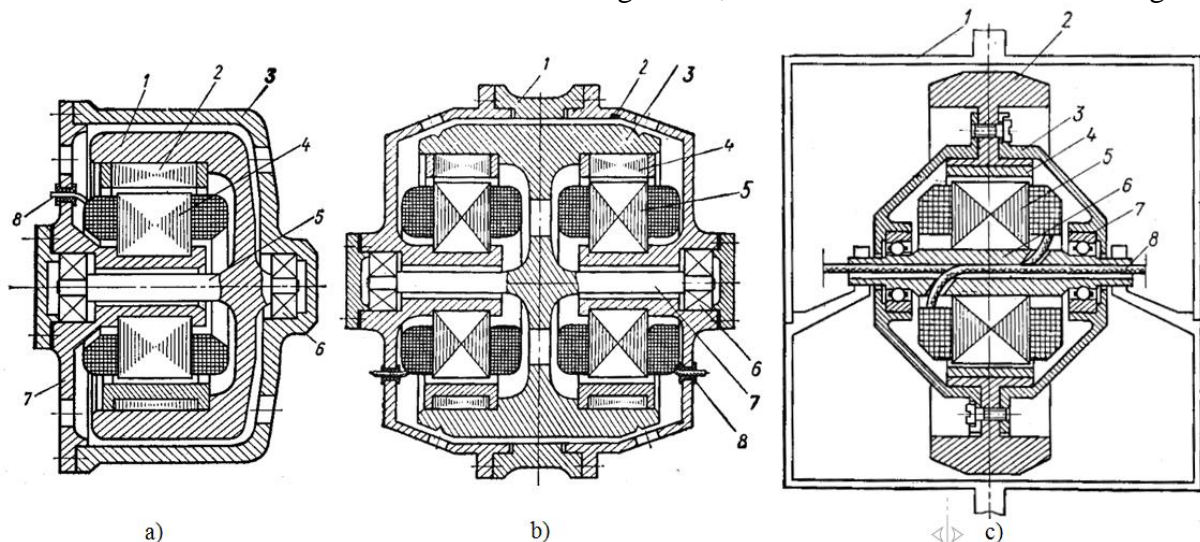


Bild 4.1: Bauarten des Kreisels

a) unsymmetrischer Kreisel

- 1 – Kreiselrotor
- 2 – Außenläuferrotor des Motors
- 3 – Schutzgehäuse
- 4 – Stator des Motors

- 5 – Achse des Kreiselrotors
- 6 – Lager
- 7 – Deckel
- 8 – Stromkabel

b) symmetrischer Kreisel

- 1 – Schutzgehäuse
- 2 – Deckel
- 3 – Kreiselrotor
- 4 – Außenläufer-rotor des Motors
- 5 – Stator
- 6 – Lager
- 7 – Achse des Kreiselrotors
- 8 – Stromkabel

c) symmetrischer Kreisel mit Vakuumgehäuse

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1 – hermetisches Gehäuse | 5 – Stator des Motors |
| 2 – Kreiselrotor | 6 – Achse des Kreiselrotors |
| 3 – Kupplung | 7 – Lager |
| 4 – Außenläuferrotor des Motors | 8 – Stromkabel |

Die diesen Bauarten entsprechenden Außenläufermotoren haben relativ kleine Drehmomente. Deshalb wird der EC-Motor (Leistung 100 W) der Firma MAXON für das entwickelte Kreiselgerät verwendet, der eine hohe Drehzahl besetzt.

Die Winkelgeschwindigkeit des Rotors kann $\Omega=30000$ U/min erreichen. Dieser Wert ist die obere Grenze der Geschwindigkeit für präzise Hybridrillenkugellager, die einen inneren Durchmesser von 35-45 mm haben. Diese Geschwindigkeit könnte höher sein, aber dazu werden teurere hochpräzise Schrägkugellager benötigt. Solche Lager werden für die Spindeln von Werkzeugmaschinen verwendet. Beispielsweise produziert die Firma NSK solche Lager, deren Winkelgeschwindigkeit für innere Durchmesser von 35-45 mm $\Omega=80000$ U/min erreichen kann.

Der im Kapitel 2 (Punkt 2.3.) beschriebene Schiffsstabilisator (Schlingerdämpfer) ist in Bild 4.2 dargestellt.

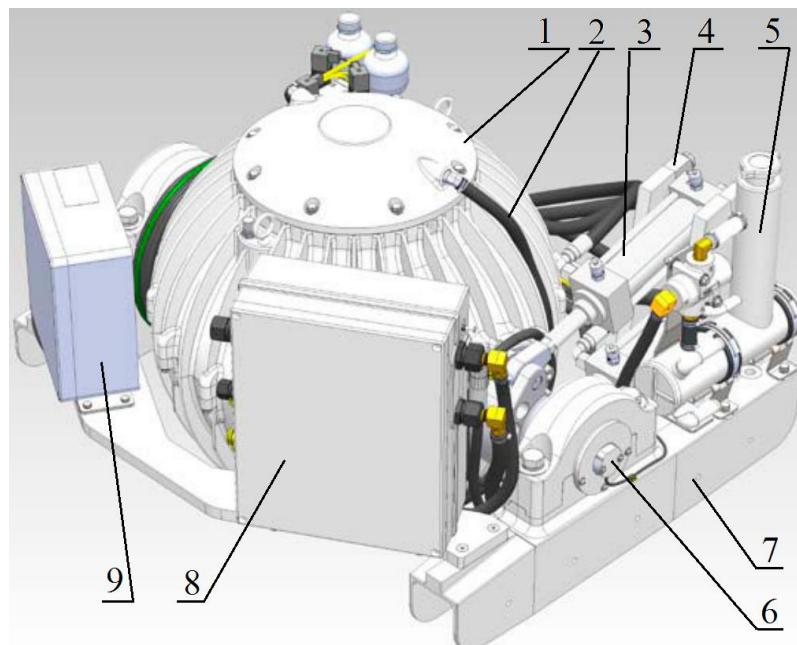


Bild 4.2: Schiffsstabilisator (Schlingerdämpfer)

- | | |
|--|--|
| 1 – Schutzgehäuse/ Kreiselrahmen | 4 – Lager des hydraulischen Antriebs |
| 2 – Strom- und Steuerungskabel | 6 – die Achse des Kreiselrahmens |
| 3 – hydraulischer Antrieb, der die Kreiselrahmen dreht | 7 – Gestell |
| 5 – Hydraulikspeicher | 8 – Hydraulikschrank (Pumpe und Ventilinsel) |
| | 9 – Elektroschrank |

Einige konstruktive Lösungen des Schlingerdämpfers können für den entwickelten Roboter nicht verwendet werden. Beispielsweise drehen sich die Kreiselrahmen des Schiffsstabilisators bis zum Winkel von 25° [82], aber die Kreiselrahmen des Kreiselgeräts des Roboters müssen sich bis zu einem Winkel von 45° drehen.

Weil die Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrotors sehr hoch ist, soll das Kreiselgerät mit einem Schutzgehäuse ausgerüstet sein. Dieses Gehäuse kann als Einzelteil mit dem Kreiselrahmen konstruiert werden (wie für den Schiffsstabilisator). Diese konstruktive Lösung verringert die Gesamtgröße und die Masse des Geräts.

Unter Berücksichtigung der Bauart des Schlingendämpfers und der Anforderungen an die Dimensionierung der Masse und der Größe des entwickelten Kreiselgeräts ist das Bauschema des Roboterkreisels in Bild 4.3 dargestellt.

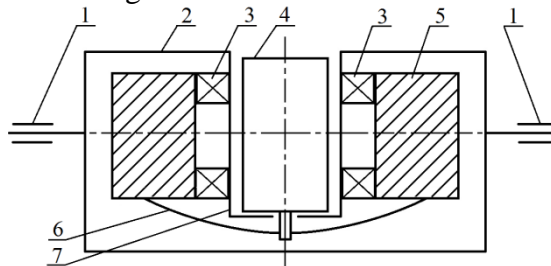


Bild 4.3: Bauschema des Kreisels

- | | |
|----------------------------------|---------------------|
| 1 – Lager der Kreiselrahmenachse | 5 – Kreiselrotor |
| 2 – Schutzgehäuse/ Kreiselrahmen | 6 – Membrankupplung |
| 3 – Lager | 7 – zentrale Hülse |
| 4 – Motor | |

Der Motor (4) ist in der Hülse (7) befestigt. Diese Hülse ist mit dem Schutzgehäuse (2) verbunden. Das Schutzgehäuse hat eine zylinderartige Bauart. Auf der Hülse sind die Lager (3) und der Rotor (5) positioniert. Der Motor treibt den Kreiselrotor über die Membrankupplung (6) an.

Der durch das Schema 4.3 entwickelte Kreiselrotor ist in Bild 4.4 dargestellt.

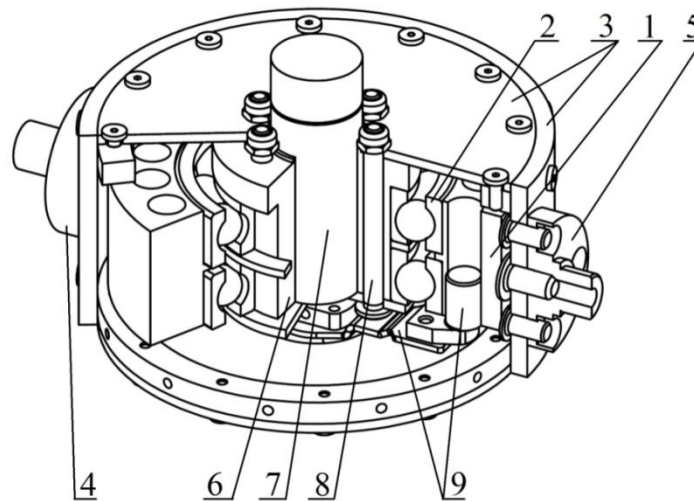


Bild 4.4: Kreisel

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 – Kreiselrotor (Stahl St52) | 5 - kleine Kreiselrahmenachse |
| 2 – Lager SKF 6008-2RZTN9/HC5C3WT | 6 - zentrale Hülse (Aluminium) |
| 3 – Schutzgehäuse/ Kreiselrahmen (CFK) | 7 - Motor MAXON EC 22 |
| 4 – große Kreiselrahmenachse | 8 - Spannschraube |
| | 9 - Membrankupplung |

Bei hohen Winkelgeschwindigkeiten des Kreiselrotors und entsprechenden Trägheitskräften verformt sich der Rotor. Durch diese Verformung kann ein Spiel zwischen dem äußeren Ring des Lagers und der inneren Zylinderfläche des Rotors entstehen. Um ein Spiel zu vermeiden, wird die genau abgemessene Schrumpfpassung (N7/k6) verwendet.

Normalerweise werden Kreiselrotoren einer Bauart wie in Bild 4.5 a) verwendet. Bei den hohen Trägheitsbelastungen entsteht eine unregelmäßige Verformung des Rotorkranzes (Bild 4.54 c). Um eine gleichmäßige Kranzverformung zu erreichen, ist der sogenannte *gebohrte Kreiselrotor* entwickelt worden (Bild 4.5 b) Dieser Kreiselrotor hat eine Masse von 0,7 kg und einen Durchmesser von 0,1 m.

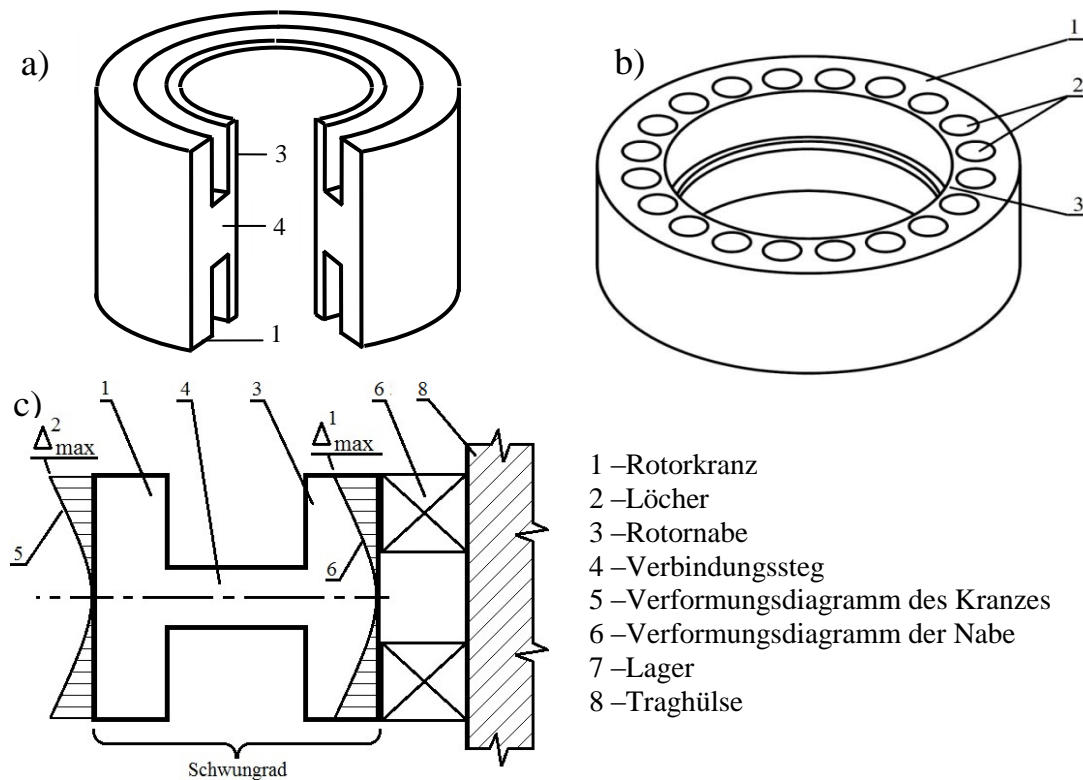


Bild 4.5: Kreiselrotoren und Kreiselrotorverformung

Eine entsprechende Festigkeitsberechnung ist notwendig, weil eine Trägheitsbelastung von der schnellen Drehung auf den Kreiselrotor wirkt. Für das 3D-Modell des Rotors ist eine Berechnung mit Hilfe der FEM-Software „SW Simulation“ ausgeführt worden. Das Spannungsdiagramm und das Verformungsdiagramm bei einer Drehgeschwindigkeit von 30 000 U/min sind in Bild 4.6 dargestellt.

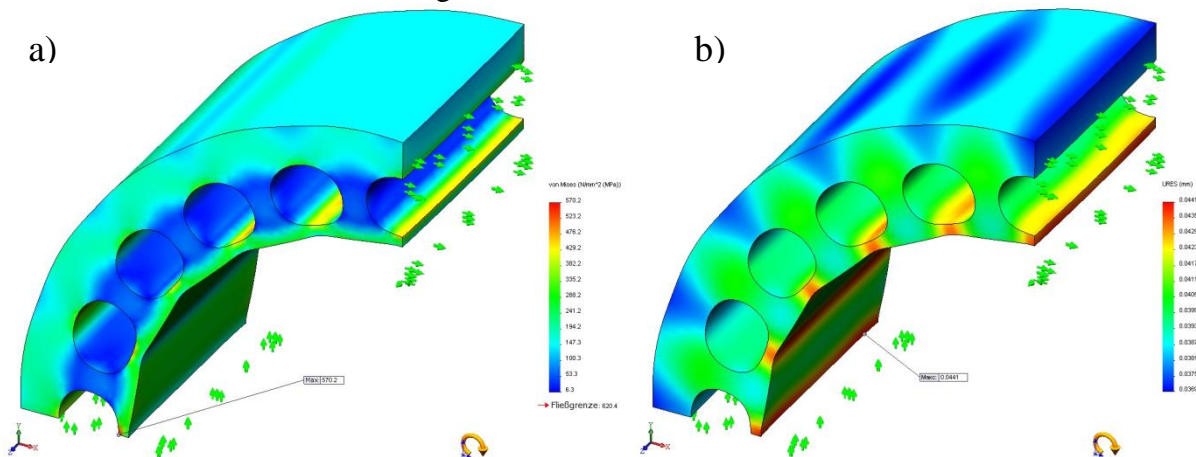


Bild 4.6: Spannungsdiagramm (a) und Verformungsdiagramm (b) des Rotors

Die maximalen inneren Mises-Vergleichsspannungen sind bis zu 570 MPa groß. Deswegen soll der Kreiselrotor aus hochlegiertem Stahl hergestellt werden, und aus diesem Grund beträgt die max. Verformung der Nabe aufgerundet 0,045 mm. Diese Verformung ist gering, dadurch entsteht kein Spiel zwischen den äußeren Lagerringen und der inneren Rotorfläche. Es ist notwendig, dass die Spannungen und Verformungen des Rotorkranzes relativ gering sind. Sie dürfen höchstens bis zu 150-160 MPa bzw. bis zu 0,025-0,03 mm betragen.

4.2.2. Tragwerk des sphärischen Pendels und sein Aufbau

Das Tragwerk des sphärischen Pendels verbindet Kreiselgerät, Akkus, Controller und Antrieb der Änderung der Bewegungsrichtung in der jeweiligen Baugruppe. Diese Baugruppe ist in Bild 4.7 dargestellt (ohne Controller und Akkus).

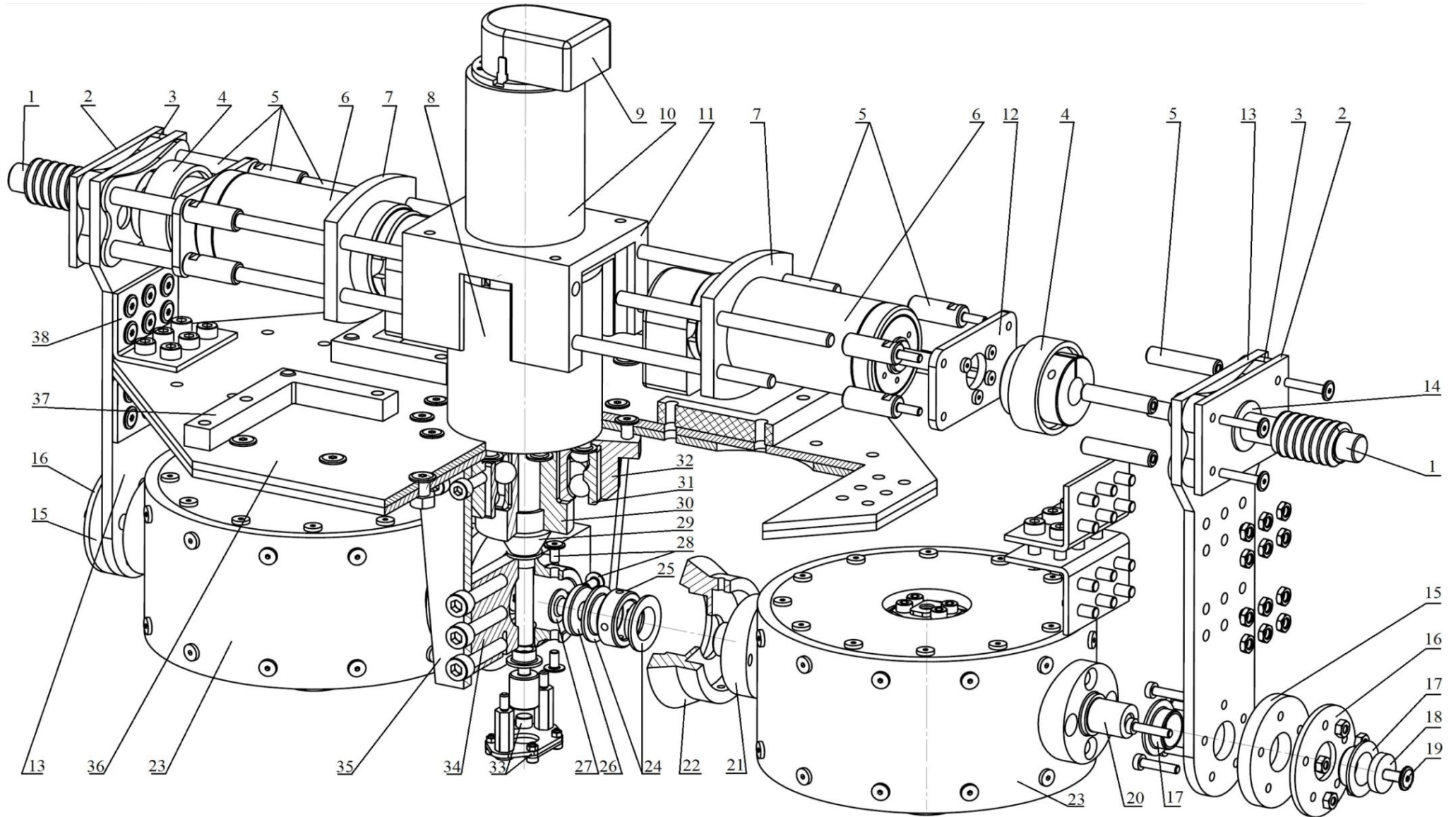


Bild 4.7: Sphärisches Pendel: Kreisel und Tragwerk

- | | |
|---|---|
| 1 – Schneckenwelle der Pendelabhängung (Stahl) | 22 – treibendes Kegelzahnrad (MÄDLER),
z=60, spiralverzahnt, induktionshärt
(Stahl) |
| 2 – Lasche der Pendelabhängung (CFK) | 23 – Kreisel |
| 3 – Unterlegplatten (Einschübe) der
Pendelabhängung (POM) | 24 – das Gleitlager der kleinen
Kreiselrahmenachse (IGUS) |
| 4 – Kupplungen | 25 – Tragring (Stahl) |
| 5 – Tragstange des Tragwerks des Motors RE-35
(Stahl/CFK) | 26 – Deckscheibe der kleinen
Kreiselrahmenachse (Stahl) |
| 6 – Antrieb der Änderung der Bewegungsrichtung
und des Pendeldrehens um die Vertikalachse
Tragplatte des Motors (POM) | 27 – Verbindungsschraube der Deckscheibe
der kleinen Kreiselrahmenachse
Verbindungsschraube der Tragringe |
| 7 – Gehäuse des Kegelradgetriebes des | 28 – Antriebskegelrad (MÄDLER), z=20,
spiralverzahnt, induktionshärt (Stahl) |
| 8 – Kreiselrahmenantriebs (Stahl)
Encoder des Kreiselrahmenantriebs | 29 – Kupplungszyylinder (Stahl)
zweireihiges Schrägkugellager des
Antriebskegelrads (SKF) |
| 9 – Motor des Kreiselrahmenantriebs | 30 – Gehäuse des zweireihigen |
| 10 – zentraler Tragblock (POM) | 31 – Schrägkugellagers des
Antriebskegelrads (Aluminium) |
| 11 – Motorplatte RE 35 (CFK) | 32 – Positionssensor des
Kreiselrahmendrehens;
Gehäuse des Kegelradgetriebes des |
| 12 – Tragwerkplatte der Pendelabhängung (CFK) | 33 – Kreiselrahmenantriebs;
Wand des Kegelradgetriebes des |
| 13 – Gleitlager der Pendelabhängung (IGUS) | 34 – Kreiselrahmenantriebs (CFK)
zentrale doppelte Tragwerkplatte |
| 14 – Unterlegscheiben der Lager der großen | 35 – (CFK)
Halter der Akkus |
| 15 – Kreiselrahmenachse (POM)
Lasche der Lager der Halbachsen der | 36 – Verbindungswinkel (CFK) |
| 16 – Kreiselrahmen (CFK)
Gleitlager der großen Kreiselrahmenachse | 37 – |
| 17 – (IGUS)
Deckscheibe der großen Kreiselrahmenachse | 38 – |
| 18 – (Stahl)
Verbindungsschraube der Deckscheibe der großen | |
| 19 – Kreiselrahmenachse
große Kreiselrahmenachse (Stahl) | |
| 20 – kleine Kreiselrahmenachse (Stahl) | |
| 21 – | |

Der Motor (10) des Kreiselrahmenantriebs ist mit zwei aufeinanderfolgenden Getrieben ausgerüstet, und zwar einem Planetengetriebe (8) und einem Kegelgetriebe. Das Kegelgetriebe besteht aus einem kleinen Antriebskegelrad (29) und zwei antreibenden Kegelzahnradern (22). Nach dem kinematischen Schema des Roboters treiben die Kreiselrahmen mit Hilfe eines Antriebs (Motor (10) mit zwei Getrieben) an. Die gesamte Getriebezahl ist $i = 63$, $i_1 = 21$ für das Planetengetriebe und $i_3 = 3$ für das Kegelradgetriebe. Der Motor ist vertikal positioniert, um eine konstruktive Symmetrie zu erreichen.

Das Drehmoment von den Motoren (6) dreht mit Hilfe der Kupplungen (4) die Schneckenwelle der Pendelabhängung (1). Der Achsendurchmesser beträgt 0,10 m, damit erreicht die Schneckenwelle die notwendige Biegefestigkeit. Die Motoren (6) sind auf den Motorplatten (12) befestigt. Diese Platten sind auf den Stangen (5) (Stahl- und CFK-Stäbe) positioniert. Die Stangen sind leicht, fest und adäquat gegen Biege- und Druckbeanspruchungen. Durch eine Schrumpfpassung sind die Tragplatten (7) des Motors (6) auf die Stangen (5) gepresst.

Die Stangen sind symmetrisch um den Motor angeordnet, um die Gleichverteilung des Motorgewichts zu gewährleisten.

Die Tragwerkplatten der Pendelabhängung (13) sind mit Laschen (2) ausgerüstet. Diese Elemente (13 und 2) bilden mit den Unterlegplatten (3) die *Pendelabhängung*. Durch die Unterlegplatten erreicht die Gesamtbreite dieser Abhängung 14 mm. In den Durchgangslöchern der Platten sind die Kunststoffgleitlager (Buchsen) (14) von IGUS

verpresst. Diese Lager sind wegen der kompakten Größe und der geringeren Masse gewählt worden.

Die Tragwerkplatten (13) und die zentrale doppelte Tragwerkplatte (36) sind durch die Verbindungswinkel (38) verbunden. Die doppelte Tragwerkplatte besteht aus zwei zusammengeschraubten 3 mm dicken Platten. Die untere Platte hat zwei große Löcher, um die Kollision mit dem Kreisel zu verhindern. Die obere Platte hat eine Zentrierbohrung für die präzise Montage mit dem Planetengetriebe (8) des Kreiselrahmenantriebs. Die VISION-Akkus werden auf der Platte (36) durch Halter (37) und Kabelbinder (siehe Bild 4.7) befestigt.

Die Lager der großen Kreiselrahmenachse (20) des Kreiselgeräts und die Pendelabhängung sind nach dem gleichen Prinzip konstruiert: Distanzplatten (15) (POM) und Laschen (16) (CFK) sind mit fünf Schrauben verbunden. Die Gleitlager (17) (IGUS) gewährleisten das Drehen der Achsen mit minimaler Reibung. Diese Achsen haben auch durchgehende Gewindebohrungen für die Verbindungsschrauben (19) der Deckscheiben (18).

Die Lager der kleinen Kreiselrahmenachse (21) des Kreiselgeräts sind jedoch anders konstruiert. Diese Baugruppe ist im Gehäuse (34) des Kegelgetriebes befestigt und soll nicht nur kompakt, sondern auch „montagefreundlich“ sein. Es soll möglich sein, diese Baugruppe (Kegelgetriebe) einfach montieren zu können. Aus diesem Grund besteht dieses Lager aus genau diesen Komponenten.

Am Anfang der Montage werden die Lager (24) (IGUS) in einem Tragrings (25) verpresst. Danach wird die Verbindungsschraube (27) mit der Deckscheibe (26) in der Mitte dieses Tragrings positioniert. Diese Schraube hat am Ende des Gewindeteils einen Schlitz für einen magnetischen Schlitzschraubendreher. Anschließend wird der Ring (34) in das Loch des Gehäuses (34) positioniert und mit den Schrauben (28) befestigt. Danach werden die antreibenden Kegelzahnräder auf die kleinen Kreiselrahmenachsen gepresst. Abschließend werden die kleinen Achsen in die entsprechenden Lager (24) eingeführt und die Schrauben (27) festgezogen. Das Festziehen der Schrauben durch die Durchgangsbohrung in der Kreiselrahmenachse (21) ist mit einem Schlitzschraubendreher möglich.

Wichtig! Die Reihenfolge der entsprechenden Operationen ist bei der Montage des Pendels genau zu beachten!

Die Kegelzahnräder (22) und (29) bilden das Kegelradgetriebe des Kreiselrahmenantriebs. Dieses Getriebe teilt die Umdrehung des Motors (9) und treibt beide Kreiselrahmen an. Das Kegelrad (29) und die Ausgangswelle des Planetengetriebes (8) sind durch den Kupplungszyylinder (30) verbunden. Das Gehäuse des Kegelgetriebes ist nicht „geschlossen“, es besteht aus den CFK-Wänden und dem Gehäuse (32) des zweireihigen Schrägkugellagers (31) des Kupplungszyinders.

Die Controller aller Motoren werden auf den Federplatten aus Chrom-Kieselstahl A689 befestigt. Dieser Stahl ist sehr ermüdungsresistent und hat hohe Dämpfungseigenschaften. Um die Schwingungen von Stoßbelastungen zu dämpfen, wird genau dieser Stahl verwendet.

Der Aufbau des Controllers und seiner Tragplatte ist in Bild 4.8 dargestellt.

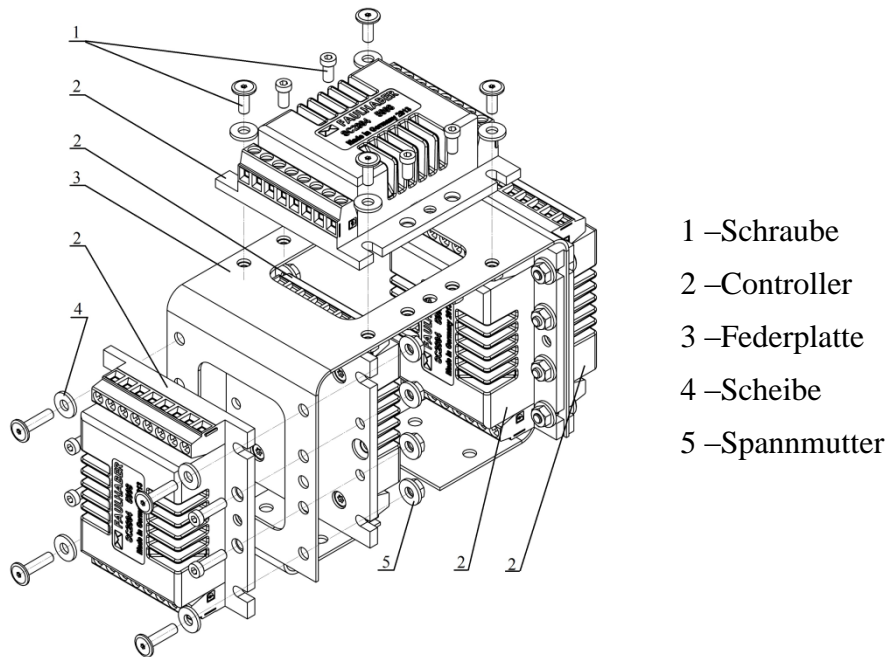
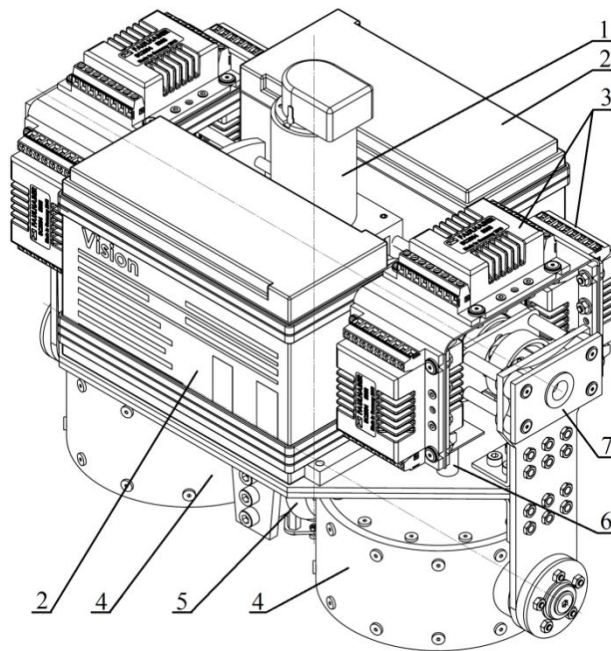


Bild 4.8: Federplatte für die Controller



Das montierte sphärische Pendel ist in Bild 4.9 dargestellt.

Bild 4.9: sphärisches Pendel

4.3. Äquatoriale Führung

Mit Hilfe der äquatorialen Führung (siehe Bild 2.5) und der Laufkatzen (zwei Laufkatzen bewegen die Führung entlang der Y-Achse) kann das sphärische Pendel um zwei Achsen drehen:

- Drehung um die Achse der Pendelabhängung, wenn die Bewegungsrichtung geändert werden soll
- Drehung um die Achse, die zur Bewegungsfläche senkrecht liegt

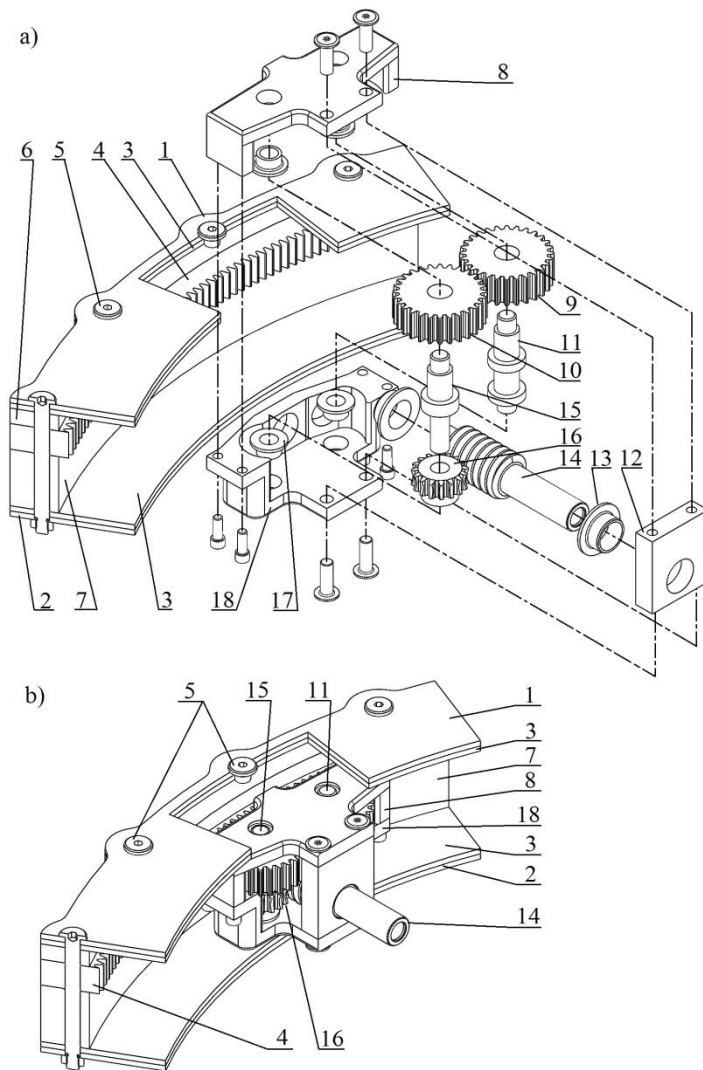


Bild 4.10: Laufkatze

- a) das Bauschema
 b) Laufkatze in der Montage

Die äquatoriale Führung besteht aus zwei halbrunden Segmenten (siehe Bild 4.11). Die Laufkatzen bewegen sich auf diesen Segmenten entlang; durch die Getriebe der Laufkatzen treiben die Motoren (Pos. 6 auf dem Bild 4.5) ein Pendel an. Das Bauschema einer verwendeten Laufkatze ist in Bild 4.10 dargestellt.

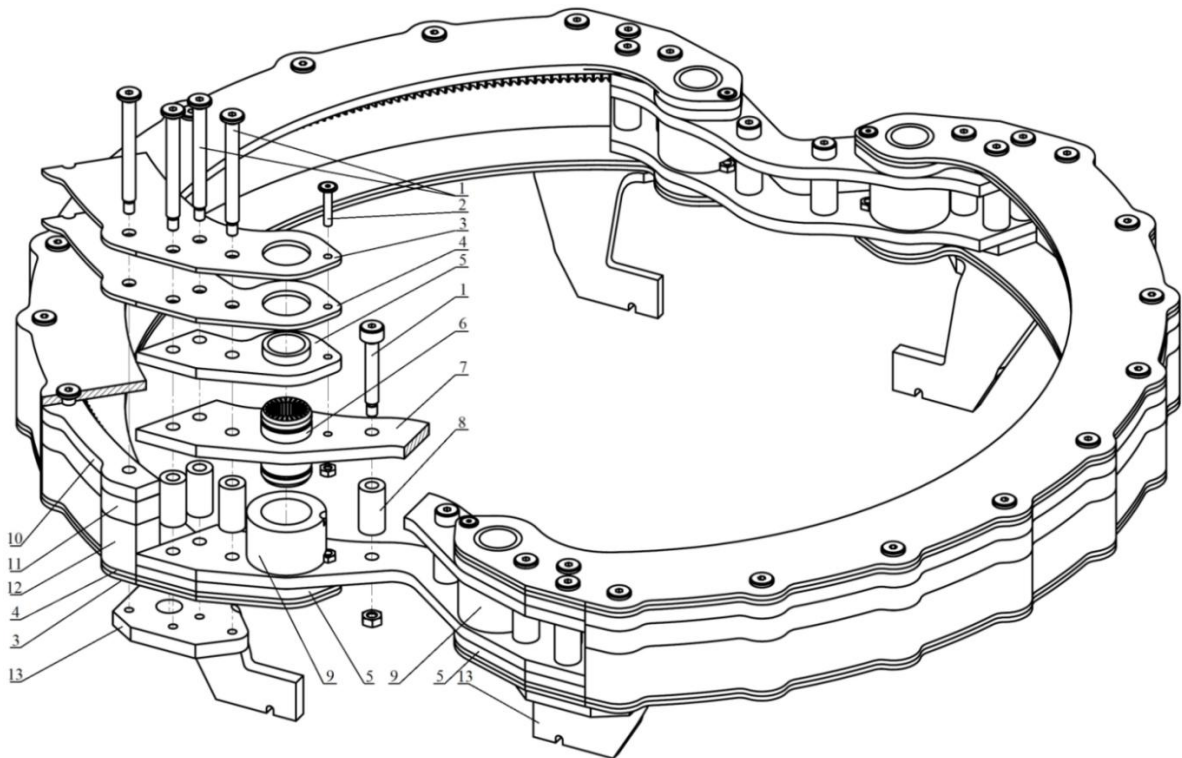
- 1 – obere Tragwerkplatte (CFK)
 2 – untere Tragwerkplatte (CFK)
 3 – Lagerplatte (Kunststoff SSFPI)
 4 – Zahnkranz (Aluminium)
 5 – Achsbolzen
 6 – obere Stütze (POM)
 7 – untere Stütze (POM)
 8 – Decke der Laufkatze (Stahl)
 9 – Hilfszahnrad (MÄDLER), $z=30$ (Stahl)
 10 – Antriebszahnrad (MÄDLER), $z=30$ (Stahl)
 11 – Welle des Hilfszahnrad
 12 – Lagergehäuse der Abhängung des Pendels (Stahl)
 13 – Schräggleitlager (IGUS)
 14 – Schneckenwelle der Abhängung des Pendels (Stahl)
 15 – Welle des Antriebszahnrad
 16 – Schneckenrad (Bronze)
 17 – Schräggleitlager (IGUS)
 18 – Laufkatze

Die äquatoriale Führung hat einen inneren geradzahnten Zahnkranz (4), der aus einer hochfesten Aluminiumlegierung nach dem *Drahterosionsverfahren* hergestellt ist. Die Zähne des Antriebszahnrad (10) greifen in den Kranz (4) ein. Das Reduziergetriebe der Laufkatze hat ein Gehäuse (8) und besteht aus zwei Zahnradgetrieben, dem Schneckengetriebe und dem Stirnradgetriebe. Dadurch kann die Drehung des Pendels um zwei Achsen ausgeführt werden:

- Wenn die Wellen (14) sich einander entgegengesetzt drehen, dann bewegen sich die Laufkatzen auf der Führung, und das Pendel dreht sich um die Achse, die zur Bewegungsfläche senkrecht gerichtet ist (Y-Achse in Bild 2.5).
- Wenn die Wellen (14) sich in der jeweiligen gleichen Richtung drehen, entsteht das „Selbstbremsen“ der Laufkatzen. In diesem Fall entsteht keine Relativbewegung zwischen den Laufkatzen und der Führung, und das Pendel dreht sich um die Achse der Pendelabhängung für die Änderung der Bewegungsrichtung (X-Achse in Bild 2.5).

Das Drehen der Welle des Motors *des Antriebs der Änderung der Hauptbewegungsrichtungen* wird von der Schneckenwelle (14) auf das Rad (16) und dann durch das Rad (10) auf den Kranz (4) übertragen. Das Hilfszahnrad (9) schafft die Symmetrie der Laufkatze und trägt zur Zuverlässigkeit ihres Betriebs bei.

Die für die beiden Laufkatzen entwickelte äquatoriale Führung ist in Bild 4.11 dargestellt.



- | | |
|---|--|
| 1 – Achsbolzen | 9 – kleine Distanzhülse (MISUMI-Normteil, Kunststoff) |
| 2 – Schrauben | 10 – obere Stütze (POM) |
| 3 – Tragwerkplatte (CFK) | 11 – Zahnkranz (Aluminium) |
| 4 – Lagerplatte (Kunststoff SFPJ) | 12 – untere Stütze (POM) |
| 5 – Distanzplatte (POM) | 13 – Haken für die Feder des Sprungmechanismus (Stahl) |
| 6 – Linearlager (IGUS) | |
| 7 – Verbindungsplatte (CFK) | |
| 8 – kleine Distanzhülse (MISUMI-Normteil, Kunststoff) | |

Bild 4.11: äquatoriale Führung

Die äquatoriale Führung hat die Form von zwei U-Profilen, die an den jeweiligen Enden verbunden sind. Es gibt zwei Kontaktflächen der Führung mit den Laufkatzen. Um die Reibung zwischen den Kontaktflächen und den Laufkatzen zu reduzieren, sind die sogenannten „Lagerplatten“ auf den jeweiligen Kontaktflächen aus dem Kunststoff IGUS SFPJ hergestellt.

Die Laufkatzen haften an diesen Lagerplatten. Die Reibung im Reibepaar „Stahl-SFPJ“ ist minimiert, weil die Teile der Laufkatze geschliffen sind. Die Festigkeit des Kunststoffs IGUS SFPJ ist niedriger als die Festigkeit von Bronze. Aber der Kunststoff ist leichter, und der Reibungskoeffizient „Stahl-SFPJ“ ist wesentlich kleiner.

Der Zahnkranz (11), die obere und die untere Stütze (10 bzw. 12), die Lagerplatten (4) und die Tragwerkplatten (3) sind alle durch Achsbolzen (1) fest miteinander verbunden. Dadurch bilden diese Teile einen „Mehrschichtblock“, der leicht und fest ist. Die Stützen sind aus mit Glasfasern verstärktem Polyoxymethylen (POM) hergestellt, und der Werkstoff der Tragwerkplatten ist CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff).

Die äquatoriale Führung und das sphärische Pendel müssen sich zusammen durch die linearen Führungen des Sprungmechanismus (siehe Bild 2.5) bewegen. Darum ist die äquatoriale Führung mit den Linearlagern (6) ausgerüstet. Diese Lager sind aus einem elastischen Kunststoff hergestellt, um mögliche Fehler der Parallelität der Führungen des Sprungmechanismus (siehe Bild 2.2) bei der Montage zu kompensieren.

Die Haken (13) verbinden die äquatoriale Führung mit den Federn des Sprungmechanismus. Diese Teile sind aus dem Stahl St.52 hergestellt.

Beide halbrunde Segmente der Führung sind mit den vier Verbindungsplatten (7) gekoppelt. Die Achsbolzen (1) verbinden diese Platten und die Segmente der Führungen fest. Die Montage muss sehr präzise sein, weil alle Bolzen geschliffene Flächen haben und die Bohrungen mit den Schrumpfpassungen für diese Bolzen mit der CNC-Maschine vorbereitet sind.

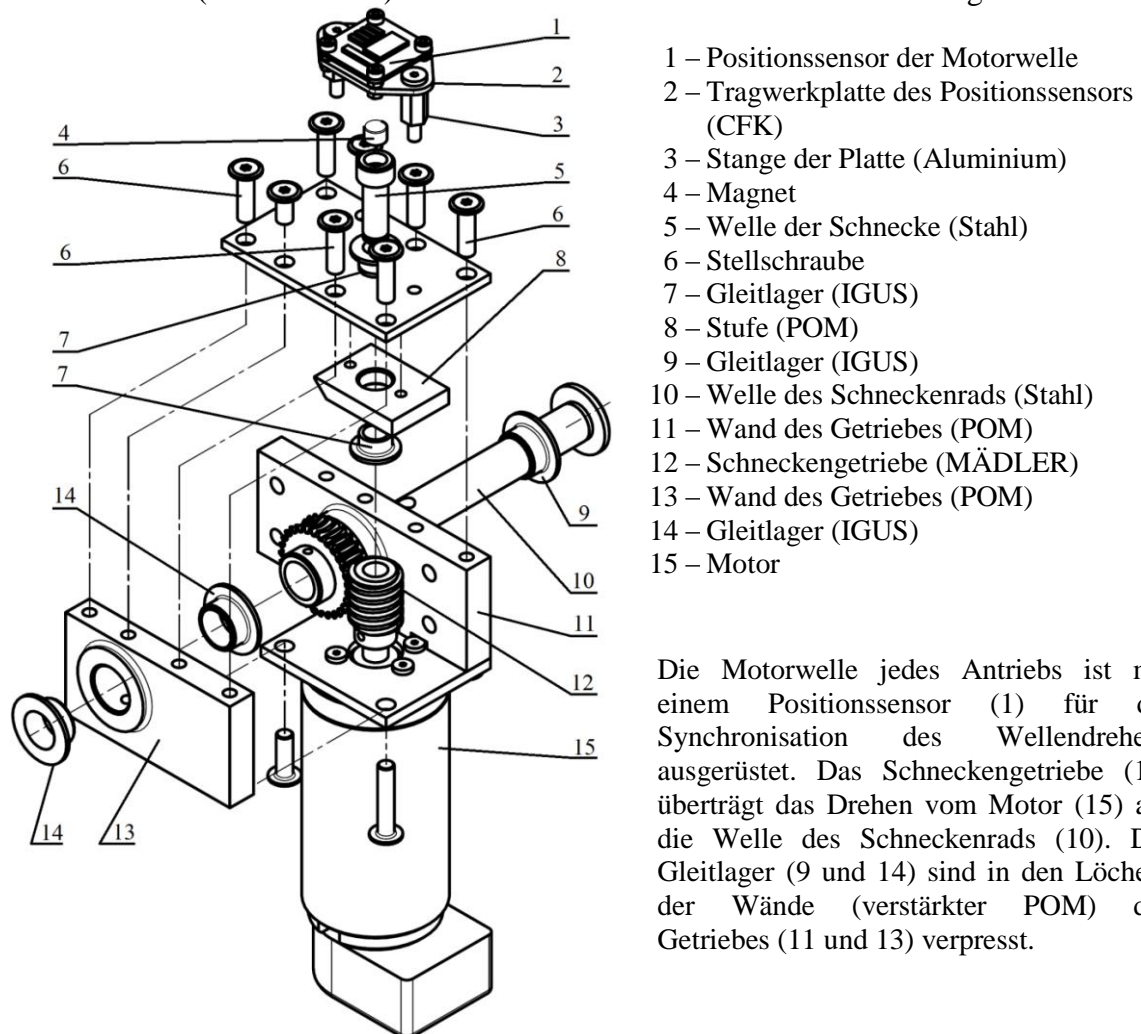
Alle Elemente der äquatorialen Führung sind mit der dreiaxialen CNC-Fräsmaschine hergestellt worden, wobei die Achsbolzen Normteile vom MISUMI sind.

4.4. Hauptbewegungsantrieb

Die Hauptbewegung des Roboters ist eine geradlinige Bewegung auf einer ebenen horizontalen Oberfläche. Für diese Bewegung soll der Roboter mit zwei Antrieben ausgerüstet sein, die alle seine innere Komponenten drehen (siehe Bilder 2.1 und 2.5).

Nach den Modellierungsergebnissen soll jeder Antrieb ein Kraftmoment bis 2 Nm entwickeln. Dadurch besteht der Antrieb der Hauptbewegung aus dem Motor MAXON RE-35 und dem Schneckengetriebe, das eine Getriebezahl von 30 hat (siehe Kapitel 3.3.). Die Normgetriebe sind zu groß und zu schwer, deswegen wird ein Sondergetriebe benötigt.

Der Roboter hat zwei Hauptbewegungsantriebe, die jeweils beidseitig symmetrisch positioniert sind (siehe Bild 2.5). Der entwickelte Antrieb ist in Bild 4.12 dargestellt.



Die Motorwelle jedes Antriebs ist mit einem Positionssensor (1) für die Synchronisation des Wellendrehens ausgerüstet. Das Schneckengetriebe (12) überträgt das Drehen vom Motor (15) auf die Welle des Schneckenrads (10). Die Gleitlager (9 und 14) sind in den Löchern der Wände (verstärkter POM) des Getriebes (11 und 13) verpresst.

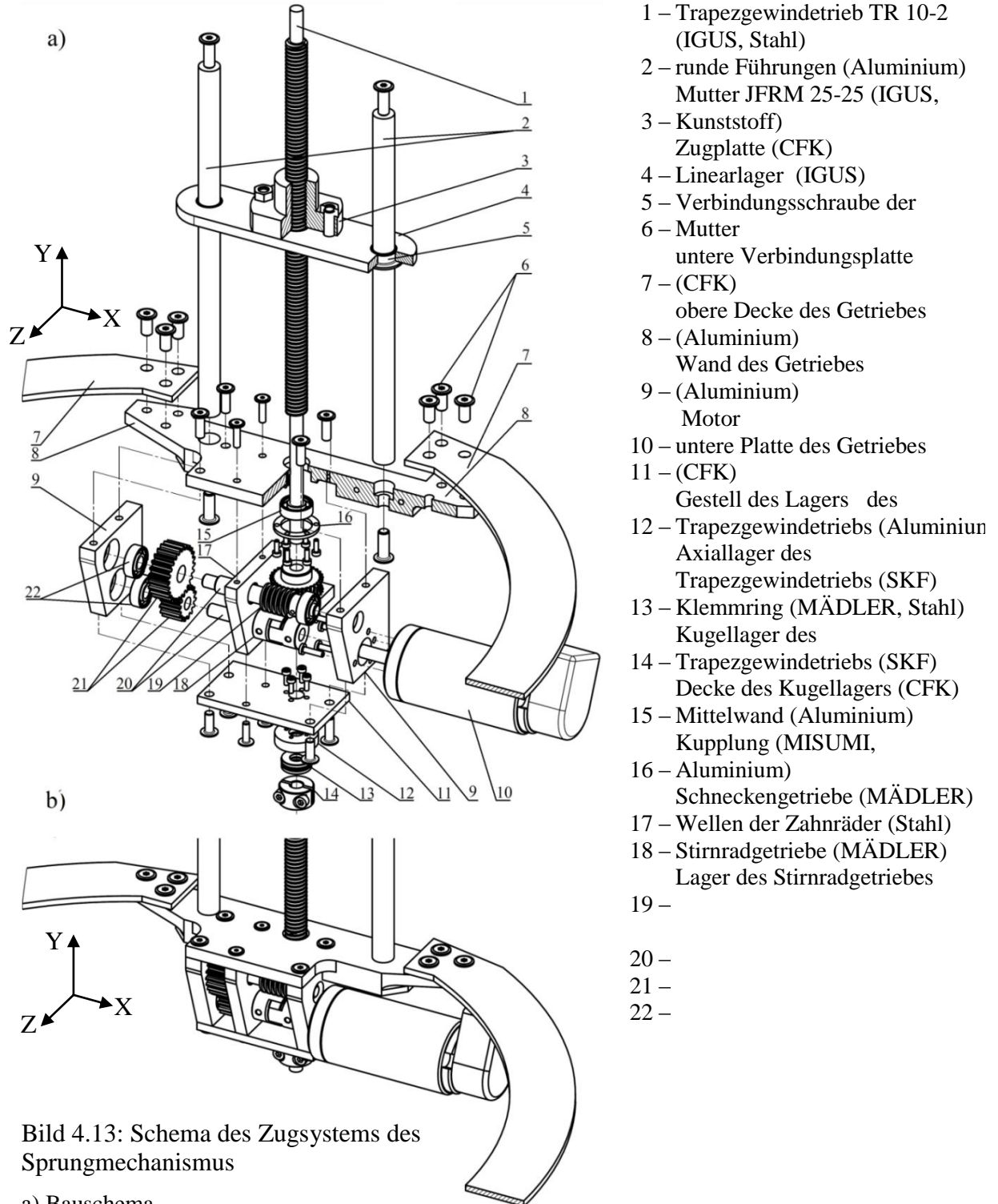
Bild 4.12: Bauschema des Hauptbewegungsantriebs

4.5. Sprungmechanismus und Haupttragwerk

4.5.1. Zugmechanismus

Das prinzipielle Schema des Sprungmechanismus des Roboters ist in Bild 2.2. dargestellt. Die Hauptelemente dieses Mechanismus sind der Zugmechanismus und die Feststelleinheit.

Der Zugmechanismus ist symmetrisch und hat zwei Gewindetribe. Das Bauschema des entwickelten Zugsystems des Sprungmechanismus des Roboters ist in Bild 4.13 dargestellt.



- 1 – Trapezgewindetrieb TR 10-2 (IGUS, Stahl)
- 2 – runde Führungen (Aluminium)
Mutter JFRM 25-25 (IGUS,
- 3 – Kunststoff)
Zugplatte (CFK)
- 4 – Linearlager (IGUS)
- 5 – Verbindungsschraube der
- 6 – Mutter
untere Verbindungsplatte
- 7 – (CFK)
obere Decke des Getriebes
- 8 – (Aluminium)
Wand des Getriebes
- 9 – (Aluminium)
Motor
- 10 – untere Platte des Getriebes
- 11 – (CFK)
Gestell des Lagers des
- 12 – Trapezgewindetriebs (Aluminium)
Axiallager des
- 13 – Klemmring (MÄDLER, Stahl)
Kugellager des
- 14 – Trapezgewindetriebs (SKF)
Decke des Kugellagers (CFK)
- 15 – Mittelwand (Aluminium)
Kupplung (MISUMI,
- 16 – Aluminium)
Schneckengetriebe (MÄDLER)
- 17 – Wellen der Zahnräder (Stahl)
- 18 – Stirnradgetriebe (MÄDLER)
Lager des Stirnradgetriebes
- 19 –
- 20 –
- 21 –
- 22 –

Bild 4.13: Schema des Zugsystems des Sprungmechanismus

a) Bauschema

b) Zugsystem in der Montage

Das für den Gewindetrieb notwendige Kraftmoment 1 Nm (siehe Kapitel 3.4.4) im Zugmechanismus entsteht mit Hilfe des Motors und des Getriebes. Dieses Getriebe besteht aus einem *Stirnradgetriebe* (21) und einem *Schneckengetriebe* (19).

Das *Stirnradgetriebe* (21) hat eine Getriebezahl von 1,4. Die Eingangswelle des Getriebes ist mit der Motorwelle über die Kupplung (18) verbunden. Die Stirnräder sind aus Edelstahl hergestellt. Die Getriebeantriebswelle dieses Stirnradgetriebes ist mit der Welle der Schnecke des Schneckengetriebes durch eine Schrumpfpassung fest verbunden.

Das *Schneckengetriebe* ist ein hochpräzises Getriebe von MÄDLER. Die Getriebezahl ist hierbei 30. Die Stahlschnecke ist geschliffen und gehärtet. Das Schneckenrad ist aus hochfester Bronze hergestellt und mit dem Spindellagers des Gewindetriebs des Zugmechanismus durch eine Schrumpfpassung fest verbunden.

Das Gehäuse des Zugmechanismus besteht aus Platten, die aus Aluminium und CFK hergestellt sind. In die Wände (9) sind die Stelllöcher für die Lager (22) gebohrt. Die obere Decke des Getriebes (8) hat Gewindebohrungen für die Verbindung der beiden symmetrischen Baugruppen des Zugmechanismus mit Hilfe der Verbindungsplatten (7).

Zwei doppelte lineare Führungen (2) sind aus Aluminiumröhrchen hergestellt. Sie sind leicht, fest und ermöglichen die Bewegung des Linearlagers (siehe Pos. 6 in Bild 4.9). Die Zugplatte (4) bewegt sich durch diese Führung entlang der Y-Achse und ist auch mit Gleitlagern (5) ausgerüstet.

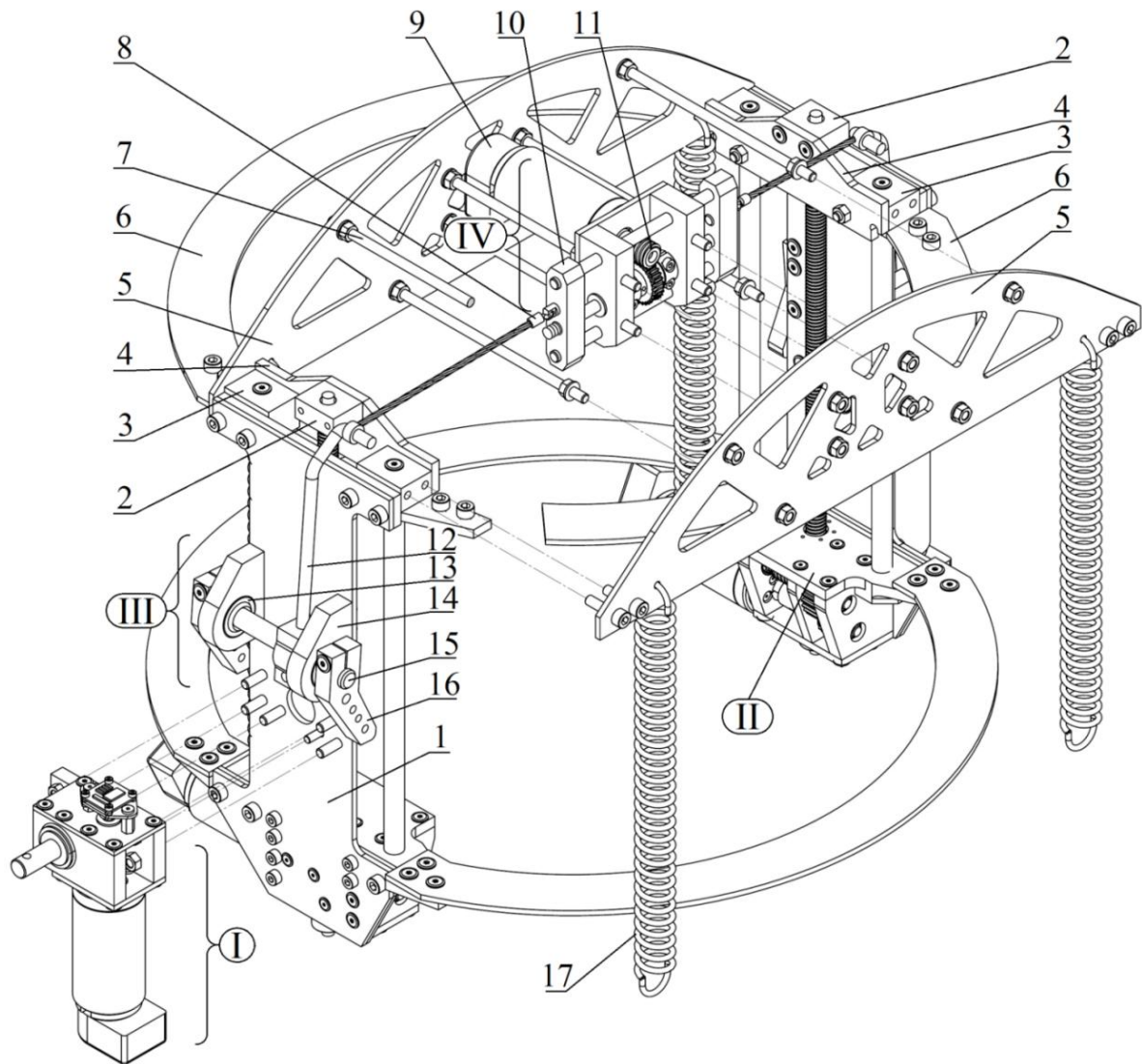
Als Gewindetrieb des Zugmechanismus ist der Trapezgewindetrieb mit dem Gewindeprofil TR 10-2 und der Mutter JFRM 25-25 von IGUS gewählt worden. Der Gewindetrieb ist mit dem Axiallager (13) ausgerüstet, das im Gestell (12) positioniert ist.

Das Drehen des Trapezgewindetriebs zieht die Zugplatte (4) durch die Mutter (3) nach unten. Die Platte (4) bewegt sich bis zum Kontakt mit der äquatorialen Führung (siehe Bild 4.9), und nach diesem Kontakt zieht die Zugplatte diese äquatoriale Führung entlang der Y-Achse nach unten (Bild 4.11). Die äquatoriale Führung ist mit den Federn des Sprungmechanismus (siehe Bild 3.25) durch die Haken verbunden, und deshalb verformt die Bewegung der äquatorialen Führung diese Federn.

Wenn sich die äquatoriale Führung in der unteren Endstellung befindet, greift die Feststelleinheit diese Führung und fixiert sie dort. Danach hebt der Gewindetrieb die Zugplatte (4) in die obere Ausgangstellung.

4.5.2. *Sprungmechanismus in der Montage und das Haupttragwerk*

Sowohl das Zugsystem des Sprungmechanismus und die Feststelleinheit als auch der Hauptbewegungsantrieb sind mit CFK-Platten fest verbunden (Bild 4.14).



- I – Hauptbewegungsantrieb
- II – Zugsystem
- III – Feststelleinheit – Halter
- IV – Feststelleinheit – Antrieb
- 1 – Wandplatte
- 2 – oberes Lager des Gewindetriebs des Zugsystems
- 3 – obere „Tragwerknase“
- 4 – Verbindungsplatte
- 5 – oberes Brückentragwerk
- 6 – untere Verbindungsplatte
- 7 – Verbindungsstange
- 8 – Triebstange der Feststelleinheit (Stahlfaden)
- 9 – Antriebsmotor der Feststelleinheit
- 10 – Laufkatze der Feststelleinheit
- 11 – Schneckengetriebe der Feststelleinheit
- 12 – Stange der Feststelleinheit
- 13 – Lager der Feststelleinheit
- 14 – Lagergehäuse der Feststelleinheit
- 15 – Welle der Halter der Feststelleinheit
- 16 – Halter der Feststelleinheit
- 17 – Feder des Sprungmechanismus

Bild 4.14: Sprungmechanismus, Hauptbewegungsantrieb und Haupttragwerk

Wenn der Roboter einen Sprung ausführen soll, muss die Feststelleinheit die äquatoriale Führung nicht mehr fixieren. Dazu muss der Motor (9) mit Hilfe des Schneckengetriebes (11) die Laufkatzen (10) verschieben. Diese Laufkatzen sind mit Hilfe der Säulen (8) mit den Stangen (12) verbunden, und diese Stangen (12) können die Wellen (15) der Halter der Feststelleinheit (16) drehen. Genau auf diese Weise treibt der Motor (9) den Halter (16), der die äquatoriale Führung freigibt.

Wichtig! Die Bügel der Säulen (8) tragen die Gewinde und sind in die entsprechenden Gewindelöcher der Laufkatzen geschraubt. Damit ist die Länge der Säulen regelbar (durch Herausschrauben/Anziehen der Bügel), um die gleichzeitige Bewegung der Halter (16) zu erreichen.

Das *Haupttragwerk* ist eine Tragwerkkonstruktion, die den Zugmechanismus, den Sprungmechanismus, die Feststelleinheit und den Hauptbewegungsantrieb in einer einzelnen Baugruppe verbindet. Das *Haupttragwerk* besteht aus den Platten (1 bzw. 5) und den Verbindungsteilen (4 bzw. 6). Um die Gesamtfestigkeit der Konstruktion zu erhöhen, ist das *Haupttragwerk* mit den Stangen (7) ausgerüstet.

4.6. Hüllkugel des Roboters

Normalerweise haben die entwickelten Kugelroboter ein starres Gehäuse. Aber die Roboter „Rotundus“ und „JollBot“ [32,40] haben weiche Hüllkugeln. Das Kugelgehäuse des Roboters „Rotundus“ ist beispielsweise aus dünnem Gummi hergestellt und kann eine Stoßbelastung verkraften. Die Kugelform des Gehäuses wird durch inneren Druck erreichbar. Also ist diese Bauart (Hüllkugel aus Gummi mit innerem Druck) für den entwickelten Roboter verwendet worden.

Die Hüllkugel ist aus Polyvinylchlorid (PVC) hergestellt und hat eine Dicke von 2 mm. Sie hat zwei beidseitige Löcher. Die Hüllkugel ist daher mit zwei runden *Seitendeckeln* ausgerüstet. Diese schließen die beidseitigen Löcher und bestehen aus Alu- und CFK-Teilen. Die *Seitendeckel* sind mit den Wellen des Hauptbewegungsantriebs des Roboters (siehe Pos. 10 in Bild 4.12) verbunden. Der Durchmesser jedes *Seitendeckels* beträgt 0,2 m.

Das Verbindungsschema der Hüllkugelkante und des *Seitendeckels* ist in Bild 4.16 dargestellt.

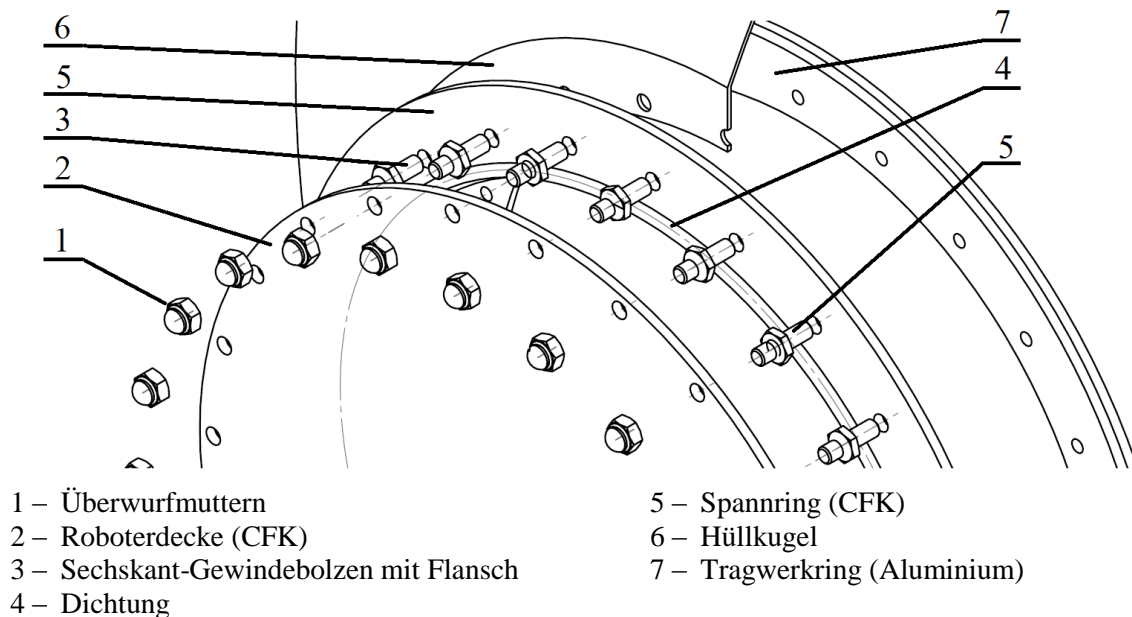


Bild 4.15: Montageschema der Hüllkugelkante und des Seitendeckels

Die Verbindung der Hüllkugelkante zu den Seitendeckeln wird wie folgt montiert:

Der Tragwerkkring (7) wird in das seitliche Loch des Kugelgehäuses positioniert. Dann wird dieser Tragring mit Hilfe des Spannrings (5) und der Gewindebolzen (3) auf der Hüllkugelkante fixiert. Auf diese Weise wird der Verstärkungsring aus den Teilen 7 und 5 gebaut. Nach der Montage der inneren Elemente und Baugruppen des Roboters werden die runden Löcher in den Seitendeckeln mit den Deckeln (2) geschlossen und mit Überwurfmuttern fixiert. Mit Hilfe der Dichtung (4) ist der Luftdruck in der Hüllkugel von 2 Bar erreichbar.

Die Hüllkugel des Roboters trägt sowohl die Stoßbelastung durch die Sprünge und die Überwindung der niedrigen Hindernisse als auch die statische Belastung durch die Gesamtmasse der inneren Elemente des Roboters. Aus diesem Grund entsteht ein Winkelspiel der Seitendeckel (Bild 4.16). Durch dieses Winkelspiel entwickeln sich Biegezusatzbelastungen, die auf die Achsen des Hauptbewegungsantriebs wirken. Um diese Belastungen zu vermeiden, darf die Verbindung der Seitendeckel zu den Achsen des Hauptbewegungsantriebs nicht starr sein. Diese Verbindung muss das geringe Winkelspiel ($\alpha = 3-5^{\circ}$, siehe Bild 4.16) kompensieren.

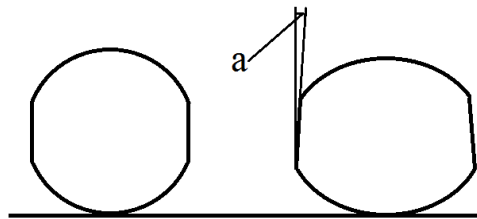


Bild 4.16: Winkelspiel der Seitendeckel

Um dieses Winkelspiel zu kompensieren, werden die Seitendeckel und die Welle des Hauptbewegungsantriebs des Roboters durch ein homokinetisches Gelenk verbunden. Ein Beispiel eines homokinetischen Gelenks (Gleichlaufgelenk eines Autos) ist in Bild 4.17 dargestellt.



Bild 4.17: Gleichlaufgelenk eines Autos

Aber die Gleichlaufgelenke für Kraftfahrzeuge sind für den entwickelten Roboter zu groß und zu schwer. Deshalb ist ein Sondergelenk entwickelt worden. Dieses Gelenk verbindet die Seitendeckel der Hüllkugel und die Welle des Hauptbewegungsantriebs des Roboters und wird als *Verbindungsgelenk* bezeichnet. Das Bauschema dieses *Verbindungsgelenks* ist in Bild 4.18 dargestellt.

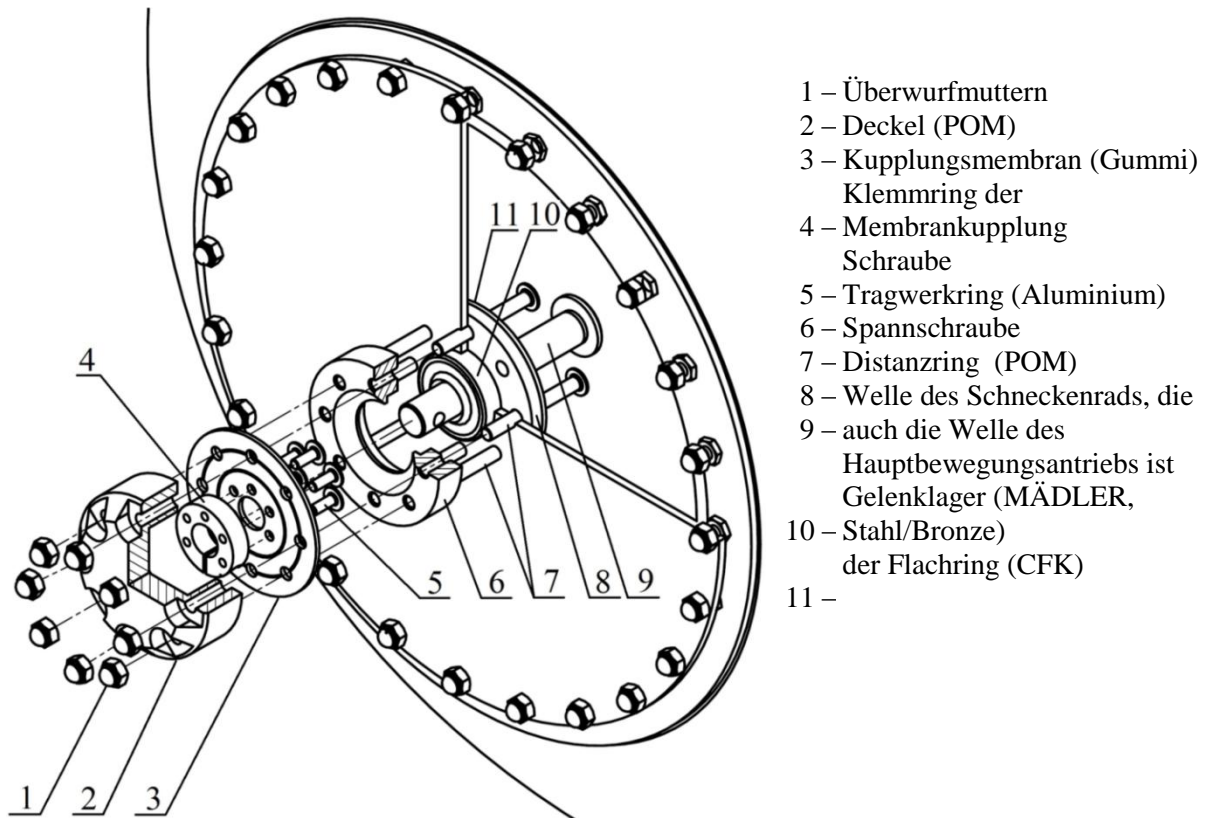


Bild 4.18: Schema des homokinetischen Gelenks (Verbindungsgelenk), das den Hauptbewegungsantrieb und die Seitendeckel der Hüllkugel verbindet

Die wichtigsten Teile des *Verbindungsgelenks* sind das Gelenklager (10) und die Membran (3), die das Winkelspiel der *Seitendeckel* kompensieren. Das Lager (10) überträgt die Masse des Roboters von der Welle (9) auf den *Seitendeckel* und weiter auf die Hüllkugel. Die Membran funktioniert wie eine Kupplung und überträgt die Drehung vom Hauptbewegungsantrieb zur Hüllkugel.

Das Gelenklager (10) ist mit dem *Seitendeckel* durch den Tragwerkring (6), den Distanzring (8), den Flachring (11) und die Spannschrauben (7) fest verbunden. Der Ring (6) hat Gewindelöcher, die bei der Montage der Baugruppe mit Schrauben-Lactaid bearbeitet werden sollten, damit die Teile 6, 8, 10 und 11 eine unlösbare Verbindung bilden.

Wichtig! Die Passung zwischen dem Lager (10) und der Welle (9) ist eine Übergangspassung für die Reduzierung des Montageprozesses.

Die Membran (3) ist mit einem Klemmring (4) ausgerüstet und so mit der Welle (9) verbunden. Mit dem *Seitendeckel* ist die Membran durch die Deckel (2) und die Schrauben (7) verbunden, die mit den Überwurfmuttern (1) angezogen sind.

4.7. Gesamtes Bauschema des Roboters

Bild 4.19 zeigt den Aufbau des entwickelten Kugelroboters.

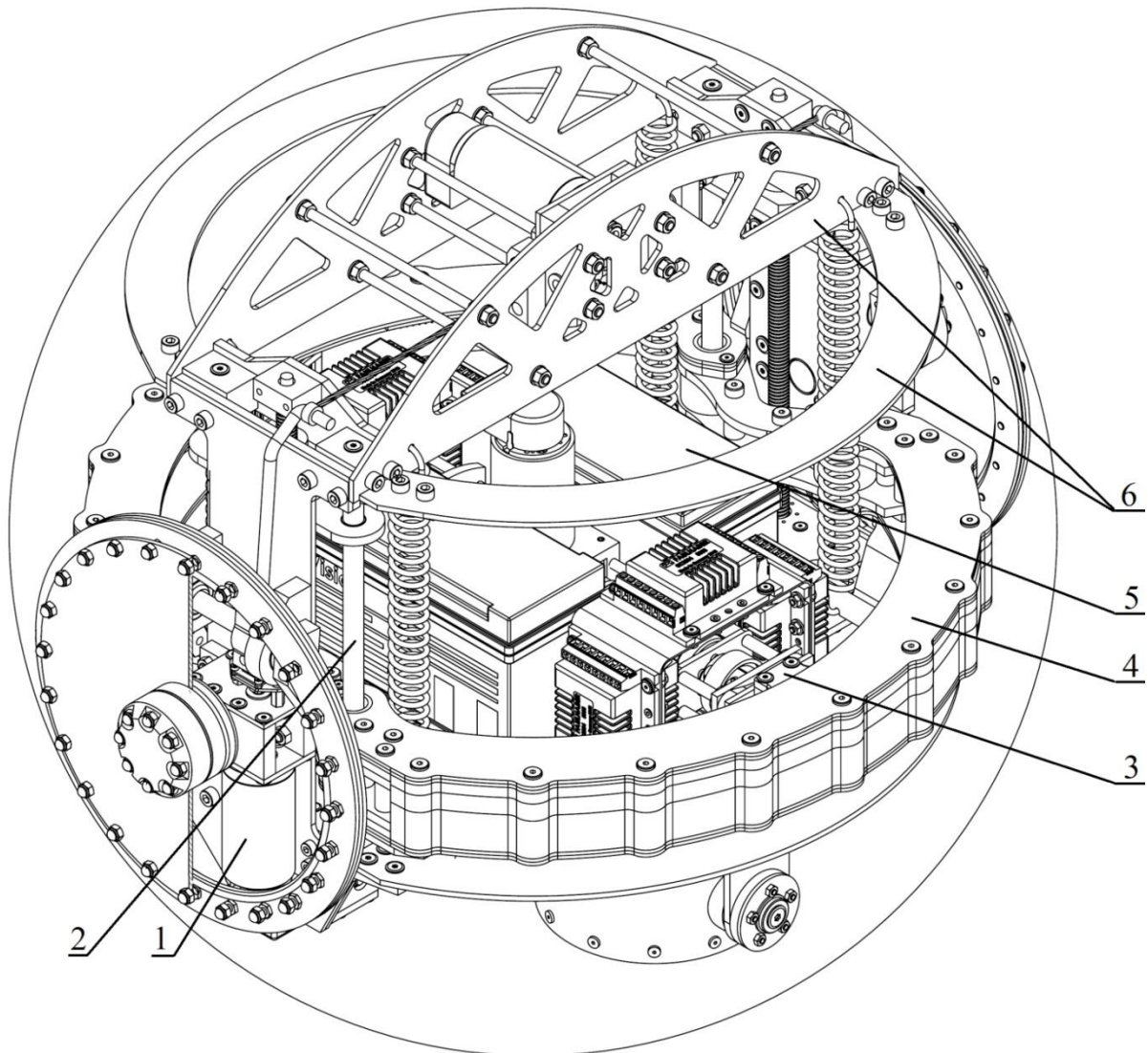


Bild 4.19: Kugelroboter

- 1 –Hauptbewegungsantriebe
- 2 –lineare Führungen
- 3 –Laufkatzen
- 4 –äquatoriale Führung
- 5 –sphärisches Pendel
- 6 –Platten des Haupttragwerks

Der Roboter wird wie folgt montiert:

Nach der Montage der Verstärkungsringe der Hüllkugel (siehe Bild 4.15) werden die inneren Elemente des Roboters innerseitig am Kugelgehäuse positioniert und damit verbunden. Dann müssen die beidseitigen Löcher in der Hüllkugel mit den jeweiligen Deckeln (siehe Bild 4.15, Pos. 2) geschlossen und mit den Überwurfmuttern festgezogen werden. Abschließend werden die Membrankupplungen (siehe Bild 4.18, Pos. 3 bzw. 4) mit den Wellen der Hauptbewegungsantriebe fest verbunden und mit den Deckeln (Bild 4.18, Pos. 2) geschlossen und diese mit den dazugehörigen Muttern fixiert.

5. Name des Roboters

Der Name des Roboters muss einerseits seine Möglichkeiten widerspiegeln, andererseits soll er auch die entwickelten Neuheiten betonen.

Abkürzungen wie ROTTO (Roboter von der OTTO-von-Guericke Universität) werden auch oft als Namen für Roboter verwendet.

Für den entwickelten Roboter wird der Name „SATURN“ gewählt. Diese Abkürzung beschreibt die Eigenschaften des Roboters und ist vorher noch nicht für die Benennung anderer Roboter verwendet worden:

Spherical

All

Terrain

Universal

Robot for

Navigation

(Damit ist der Name «SATURN» für den entwickelten Roboter einzigartig.)

6. MONTAGE DES ROBOTERS

Im sechsten Kapitel werden die Montage des Kugelroboters SATURN und seine Merkmale kurz beschrieben bzw. illustriert.

Die Montage des Roboters SATURN geschieht in folgenden drei Stufen:

- Montage der innerseitigen Komponenten
- Vorbereitung der Hüllkugel
- Zusammenfügen der innerseitigen Komponenten und der äußeren Hüllkugel

6.1. Innerseitige Komponenten

Im ersten Schritt werden die relativ kleinen Baugruppen montiert: Kreiselgerät, Hauptbewegungsantrieb, Zugmechanismus, Feststelleinheit, Laufkatzen etc. Danach folgen die Hauptelemente, die aus den kleineren zusammgebaut werden: sphärisches Pendel, äquatoriale Führung und Haupttragwerk. Abschließend müssen diese inneren Mechanismen des Roboters verbunden und mit den Controllern bzw. mit der anderen Elektronik ausgerüstet werden. Vor jedem nächsten großen Schritt der Roboter Montage werden alle inneren Systeme und Mechanismen getestet bzw. geprüft. Die wichtigsten Phasen des Montageprozesses sind jeweils in den Bildern 6.1 – 6.4 dargestellt.

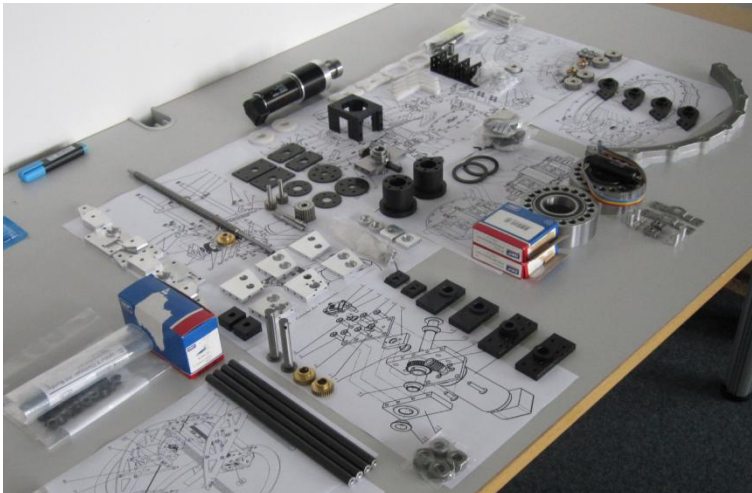


Bild 6.1: Teile des Roboters

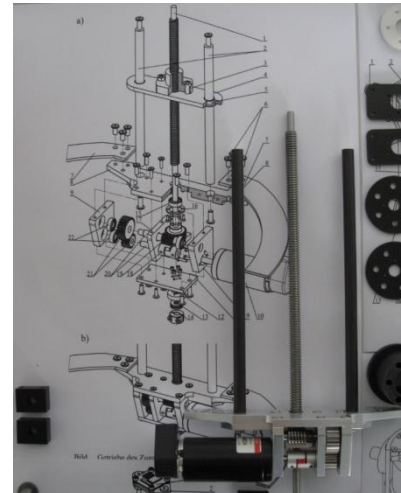


Bild 6.2: Zugmechanismus

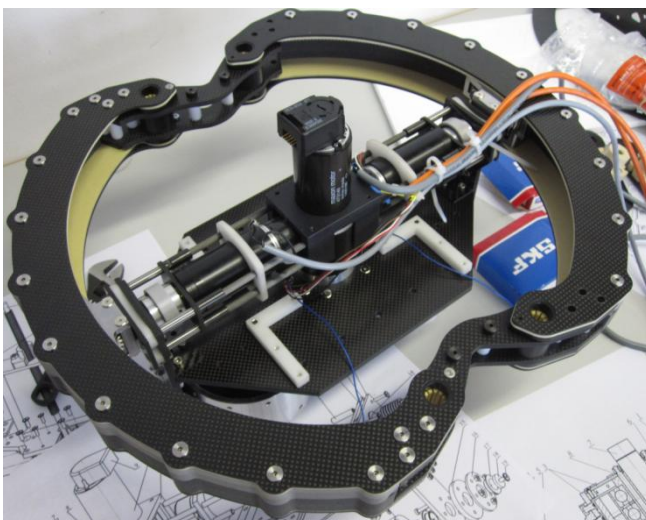


Bild 6.3: äquatoriale Führung und sphärisches Pendel

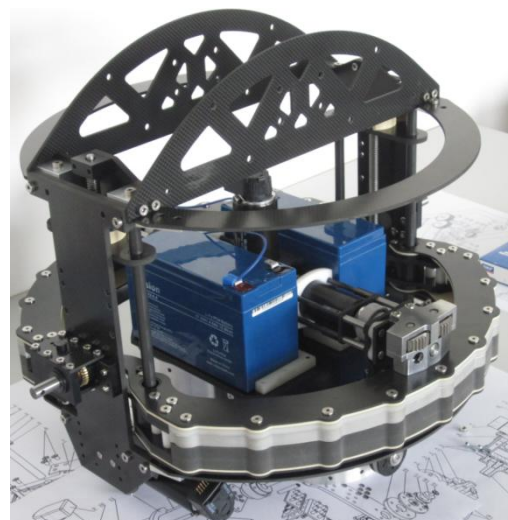


Bild 6.4: Haupttragwerk, äquatoriale Führung und Pendel in der Montage

6.2. Montage der Hüllkugel



Die Montage der inneren Komponenten des Roboters durch die Löcher in den Verstärkungsringen der Seitendeckel (siehe Kap. 4.6.) ist möglich. Um aber die Komplexität der Wartungsprozesse für den Roboter zu minimieren, wird die Hüllkugel mit einem hermetischen Reißverschluss ausgestattet.

Der Reißverschluss ist von der Firma TIZIP hergestellt und kann einen inneren Luftdruck von 1,8 Bar gewährleisten. Die maximale Querkraft (Reißfestigkeit) für diesen Reißverschluss ist 300 N/cm, die Gesamtlänge beträgt 90 cm (Bild 6.5).

Der Reißverschluss ist durch REMA SC-4000-Kleber mit der Hüllkugel verklebt. Die Entwicklung dieses Klebprozesses zur hermetischen Abriegelung der Hüllkugel ist sehr zeitaufwendig gewesen.

Bild 6.5: Hüllkugel mit den Seitendeckeln

6.3. Fertigstellung des Roboters

In einem letzten Schritt der Montage des Roboters werden die inneren Komponenten in die Hüllkugel „eingezogen“. Dann müssen die *Verbindungsgelenke* (siehe Kap. 4.6., Bild 4.17) mit ihren Deckeln montiert werden. Der Reißverschluss wird geschlossen, damit Luft in die Hüllkugel gepumpt werden kann. Danach ist der Roboter einsatzfähig.

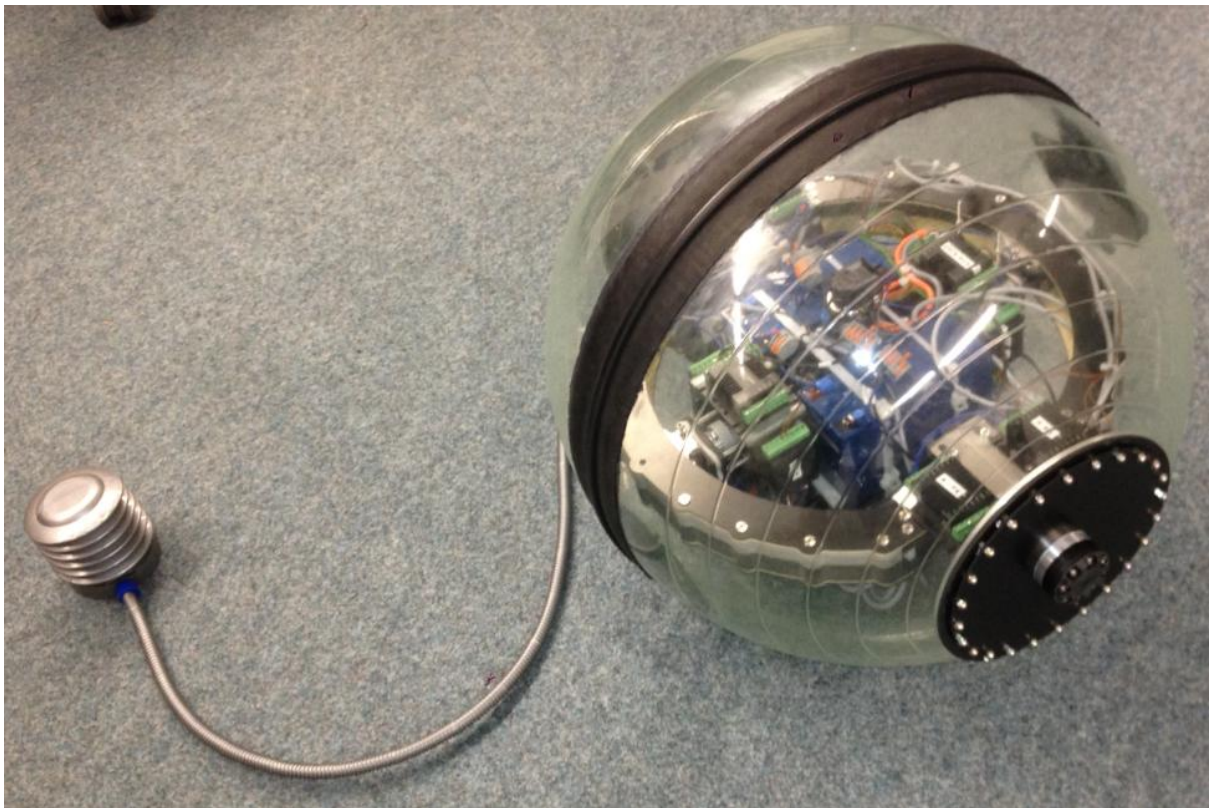


Bild 6.6: Kugelroboter mit Fußpumpe

7. EXPERIMENTE

Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse der praktischen Experimente mit dem fertigen Roboter (Bewegung auf der gleichmäßig horizontalen Oberfläche, Überwindungsprozess der Hindernisse u.a.) beschrieben. Danach werden die Erfahrungsdaten mit den Ergebnissen der Modellierung verglichen.

7.1. Liste der Experimente

Folgende Experimente mit dem Roboter müssen ausgeführt werden, damit die Erfahrungsdaten mit den Ergebnissen der Modellierung verglichen werden können:

1. Der Roboter soll eine geradlinige Bewegung mit einer Beschleunigung bis zum Sollwert der Geschwindigkeit (2 m/s) erreichen. Mit dieser Geschwindigkeit soll er eine gleichmäßige Bewegung ausführen und danach durch eine Bremsung zum Stillstand kommen. Der Roboter bewegt sich auf einer gleichmäßig horizontalen Oberfläche, die keine Hindernisse hat. Die Bewegungsrichtung ist konstant, und das Kreiselgerät ist nicht aktiv.

Ziele dieser Aufgabe sind die Bestimmung der dynamischen Parameter (Beschleunigung und Bremsung) des Roboters mit den gegebenen Massenträgheitscharakteristika seiner Elemente und inaktivem Kreiselgerät bzw. der Vergleich der Erfahrungsdaten mit den Ergebnissen der Modellierung.

2. Die Bewegungsaufgabe des Roboters ist dieselbe wie in der ersten Aufgabe (Beschleunigung in eine gleichmäßige Bewegung und dann Bremsung) mit dem Unterschied, dass das Kreiselgerät in Betrieb ist. Auch die Oberflächenparameter sind dieselben wie in der ersten Aufgabe. Die Winkelgeschwindigkeit des Rahmens beträgt 1,5-10 U/min, um ein möglichst andauerndes *Hilfsmoment* zu erreichen.

Ziele dieser Aufgabe sind die Bestimmung der dynamischen Parameter (Beschleunigung und Bremsung) des Roboters mit aktivem Kreiselgerät und der Vergleich der Erfahrungsdaten der entsprechenden Charakteristika der Bewegung bei jeweils inaktivem und aktivem Kreiselgerät.

3. Der Roboter soll einen Sprung ausführen. Die Sprunghöhe muss dabei mindestens 15 cm betragen.

Zweck ist die Prüfung der Sprungmöglichkeit des Roboters.

4. Der Roboter soll beschleunigen und die weitere Bewegung mit einer konstanten Geschwindigkeit und jeweiliger Änderung der Bewegungsrichtung ausführen. Das Kreiselgerät ist hierbei in Betrieb. Der Roboter soll auf einer 4 m²-Fläche eine Wendung ausführen (der Wenderadius muss über 1 m sein).

Zweck ist die Bestimmung der 2D-Trajektorie der Roboterbewegung auf einer gleichmäßig horizontalen Oberfläche.

5. Der Roboter soll ein Hindernis (bspw. Stufe) überwinden. Die Höhe des Hindernisses beträgt bis zu 7,5 cm.

Zweck ist die Prüfung der Möglichkeit des Roboters, kleinere Hindernisse mit Hilfe des Kreiselgeräts zu überwinden.

7.2. Ergebnisse der Experimente

7.2.1. Aufgabe 1: Bewegung des Roboters mit inaktivem Kreiselgerät

Der Roboter soll eine geradlinige Bewegung mit einer Beschleunigung bis zum Sollwert der Geschwindigkeit **1,5 m/s** in der Zeit **2÷2,5 s** erreichen. Mit dieser Geschwindigkeit soll er eine gleichmäßige Bewegung über **6 s** ausführen und danach durch eine Bremsung in der Bremszeit **2÷2,5 s** zum Stillstand kommen. Der Roboter bewegt sich auf einer gleichmäßig horizontalen Oberfläche, die keine Hindernisse aufweist. Die Bewegungsrichtung ist konstant, und das Kreiselgerät ist nicht aktiv.

Die Veränderung der Geschwindigkeit des Roboters beim Anlauf und bei der Bremsung ist in Bild 7.1b dargestellt. Die Beschleunigungszeit beträgt **2,25 s**. Wenn diese Zeit geringer ist, entstehen die Geschwindigkeitsverluste, wie in Bild 7.1a, (bei einer Beschleunigungszeit von **1,5 s**) zu sehen ist.

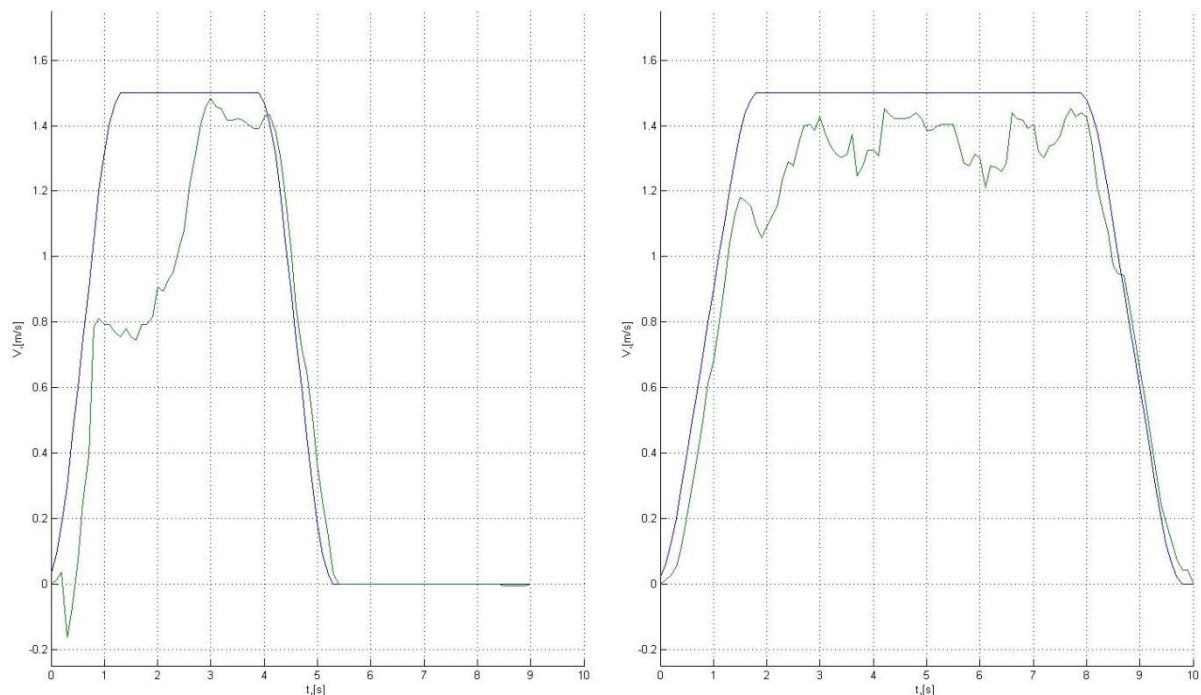


Bild 7.1: Veränderung der Translationsgeschwindigkeit des Roboters

- Geschwindigkeitsverluste bei einer Beschleunigungszeit von **1,5 s**
- Beschleunigung des Roboters in der Zeit von **2,25 s** ohne Geschwindigkeitsverluste

Die Darstellung der Veränderung der Translationsgeschwindigkeit des Roboters in Bild 7.1b korreliert gut mit der theoretischen Veränderung der Robotergeschwindigkeit (siehe Bild 3.9, Kap. 3.3.). Bei der MATLAB-Simulation hat der Roboter eine vergleichbare Geschwindigkeit in der Zeit von **2,5-3 s** erreicht.

Die Dynamik der Bewegung des gebauten Prototyps ist ein wenig höher als die Dynamik des Roboters im MATLAB-Modell. Das hat folgenden Grund. Durch die Verformung der Hüllkugel unter der Einwirkung des Robotergewichts verschiebt sich die Position des Schwerpunkts des Pendels näher zur Bewegungsoberfläche hin. So wird die Bewegung des Roboters durch die Schwerpunktverschiebung effektiver (siehe [32] und Bild 3.3).

Deshalb kann Folgendes postuliert werden: *Die Simulation der Roboterbewegung mit inaktivem Kreiselgerät ist relativ korrekt; die Bewegung des gebauten Roboters korreliert mit der Bewegung des Roboters im MATLAB-Modell.*

7.2.2. Aufgabe 2: Bewegung des Roboters mit aktivem Kreiselgerät

Der Roboter soll eine geradlinige Bewegung mit einer Beschleunigung bis zum Sollwert der Geschwindigkeit **1,25 m/s** in der Zeit von **1 s** erreichen. Mit dieser Geschwindigkeit soll er eine gleichmäßige Bewegung über einige Sekunden ausführen und danach durch eine Bremsung in der Bremszeit von **1 s** zum Stillstand kommen. Der Roboter bewegt sich auf einer gleichmäßig horizontalen Oberfläche, die keine Hindernisse aufweist. Die Bewegungsrichtung ist konstant. Das Experiment fängt in der 70. Sekunde an, weil die Kreiselrotoren diese Zeit benötigen, um bis zur Ausgangsgeschwindigkeit (15 000 U/min) zu beschleunigen.

Das Kreiselgerät ist aktiv und entwickelt das Hilfsmoment für die Verbesserung der dynamischen Parameter des Roboters. Die Winkelgeschwindigkeit jedes Kreiselrotors beträgt **15 000 U/min**. Die Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrahmens liegt bei **20 U/min**. Der Drehwinkel des Rahmens ist **30°** (die Drehwinkelveränderung zeigt Bild 7.3).

Die Veränderung der Geschwindigkeit des Roboters ist in Bild 7.2 dargestellt.

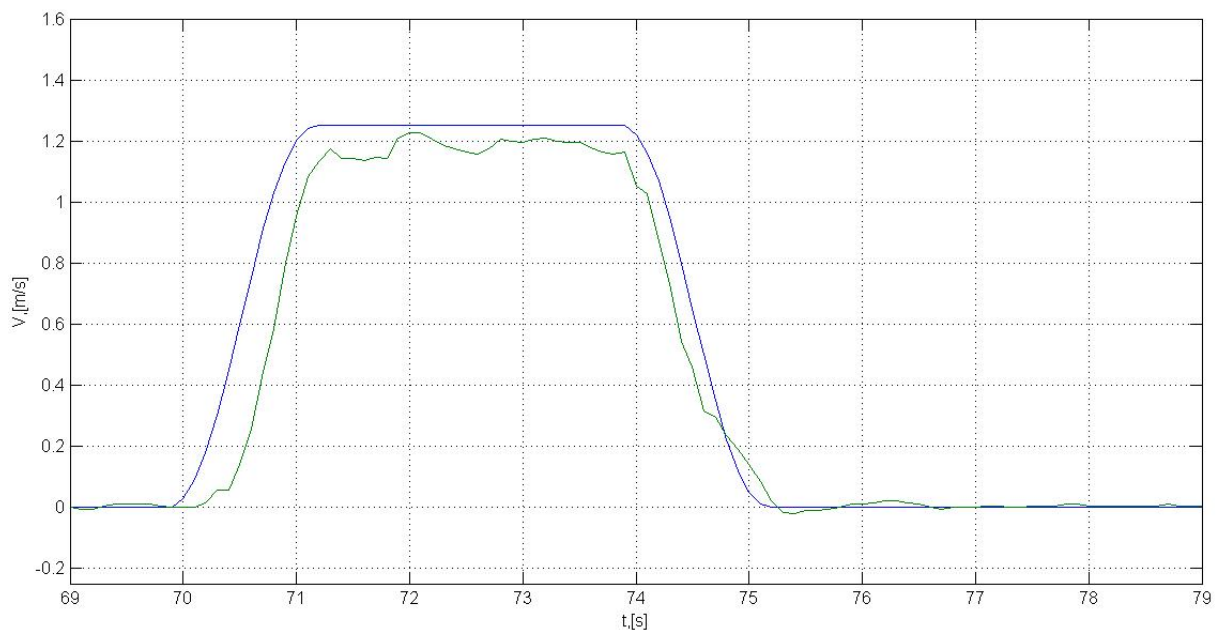


Bild 7.2: Veränderung der Geschwindigkeit des Roboters beim Anlauf und bei der Bremsung

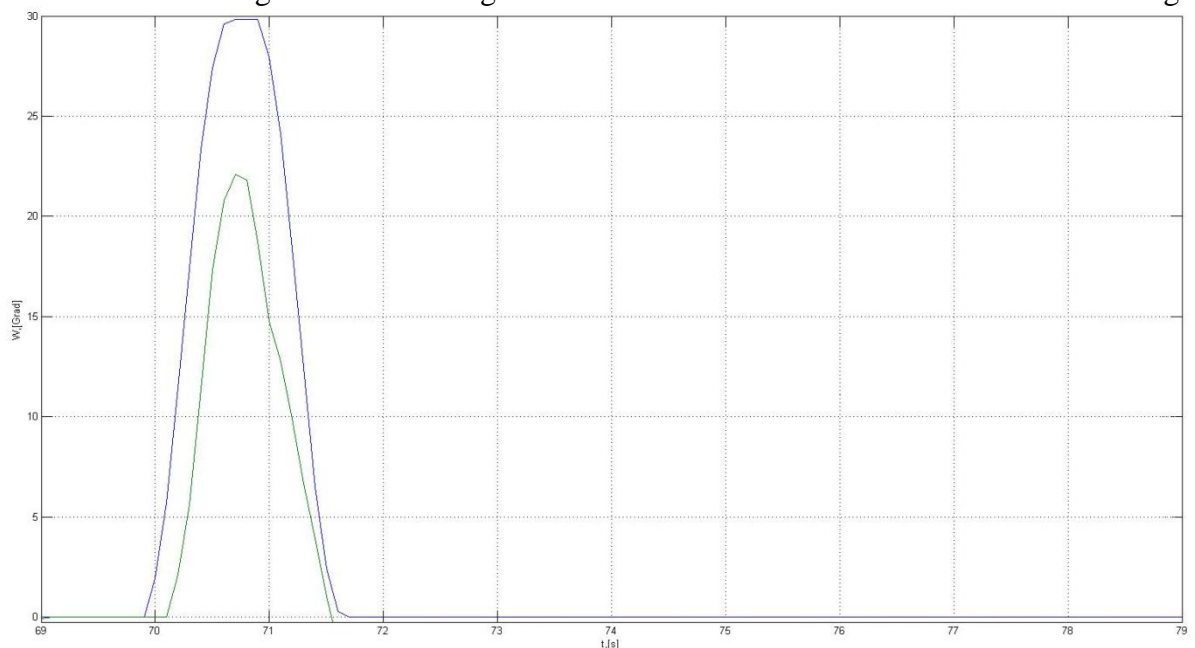


Bild 7.3: Veränderung des Drehwinkels des Kreiselrahmens

Durch die Beschleunigungszeit von **1s** erreicht der Roboter die benötigte Geschwindigkeit ohne Geschwindigkeitsverlust. Danach ist die Beschleunigungsdynamik des Prototyps um mehr als das **Doppelte erhöht**. Der Drehwinkel des Kreiselrahmens ist kleiner als 30° , kann aber die Rahmen nach der Hilfsmomententwicklung in den „Nullstand“ zurückdrehen.

Die Darstellung der Verbesserung der Beschleunigungszeit des Roboters in Bild 7.2 korreliert gut mit der theoretischen Verbesserung der Dynamik der Bewegung des Roboters (siehe Bild 3.9, Kap. 3.3.). Bei der MATLAB-Simulation hat der Roboter mit Hilfe des Kreiselgeräts die Beschleunigungsdynamik zweifach verbessert.

Aber durch dieses Experiment sind folgende Probleme offenbar geworden:

1. Wegen der sehr hohen Winkelgeschwindigkeit der Kreiselrotoren und der Minderauswuchtung entstehen Schwingungen des sphärischen Pendels bei einer Rotorgeschwindigkeit **>12 000 U/min**).
2. Der Schieber des Reißverschlusses der Hüllkugel wirkt auf den Roboter bei seiner Bewegung als Hindernis. Um diese Wirkung zu verringern, sollte die Hüllkugel mit der äußeren Bandage ausgerüstet sein.

Durch die beschriebenen Probleme entstehen Schwingungen des sphärischen Pendels um die Achse *des Hauptbewegungsantriebs* des Roboters. Diese Schwingungen sind in Bild 7.4 dargestellt. Wegen des beschriebenen Reißverschlussproblems ist auch der Neigungswinkel des Pendels durch die Bewegung des Roboters hoch (bis 45°). Für die Beschleunigungszeit (70. -71. Sekunde) ist dieser Neigungswinkel trotzdem relativ klein, weil das Kreiselgerät funktioniert.

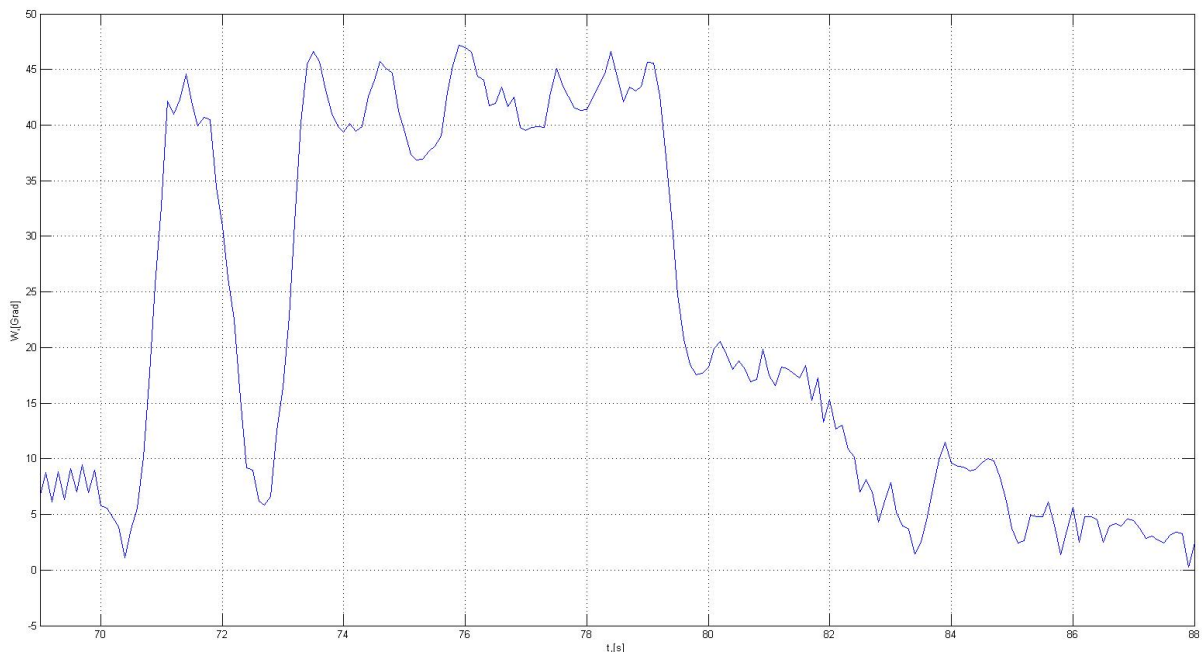


Bild 7.4: Veränderung des Neigungswinkels des Pendels und entstehende Schwingungen

Um das Schwingungsproblem zu vermeiden, müssen die Kreiselrotoren besser ausgewuchtet sein. Auch die Hüllkugel mit dem Reißverschluss muss mit einem Sonderschieber ausgerüstet sein, der flach ist und einen flachen Schiebergriff hat.

Auf Grund der Ergebnisse des Experiments mit aktivem Kreiselgerät kann Folgendes postuliert werden. *Die zweifache Verbesserung der Dynamik der Roboterbewegung (Beschleunigung) ist mit Hilfe des Kreiselgeräts entstanden. Die Simulation der Roboterbewegung mit aktivem Kreiselgerät ist relativ korrekt; die Bewegung des gebauten Roboters korreliert mit der Bewegung des Roboters im MATLAB-Modell.*

7.2.3. Aufgabe 3: Robotersprung

Der Roboter soll einen Sprung ausführen und eine Sprunghöhe von bis zu 15 cm erreichen. Die gesamte Steuerungselektronik ist abmontiert worden. Weil der Abbau der Elektronik des Pendels zu schwierig ist, ist das ganze sphärische Pendel ausgebaut worden. Die Masse des Pendels ist mit Hilfe der Stange mit zwei Massen kompensiert worden. Weil das Gehäuse aus verstärktem Polyvinylchlorid zu weich ist, ist der Prototyp des Roboters nicht mit der Hüllkugel ausgerüstet, sondern er hängt an der Seilaufhängung.

Die Federverformung beträgt 135 mm.

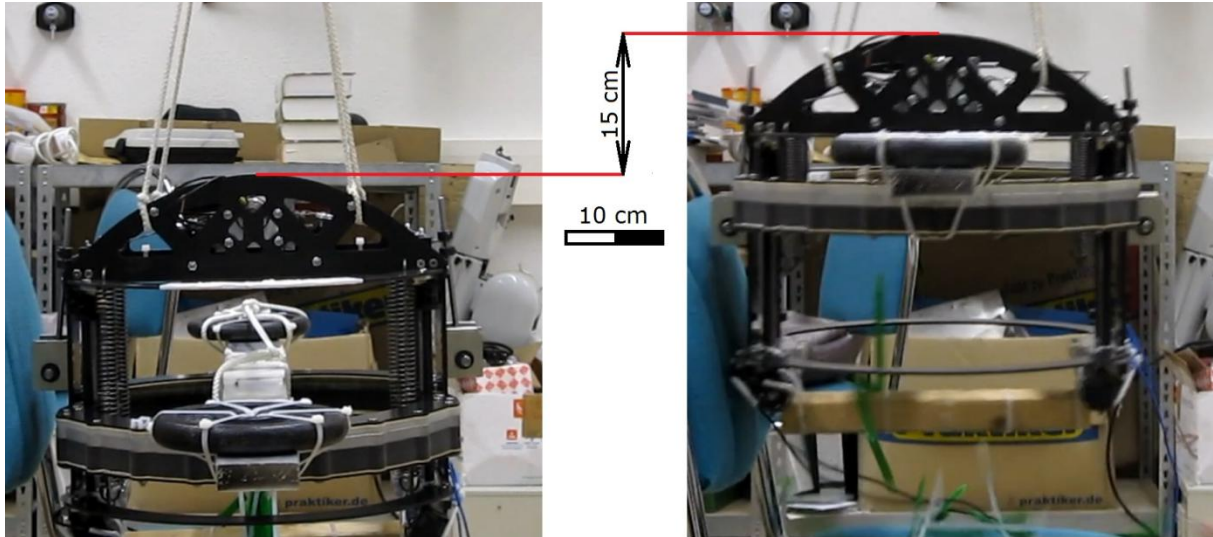


Bild 7.5: Sprung des Roboters

Die erreichte Sprunghöhe beträgt 15 cm. Das ist weniger als die theoretische Sprunghöhe (bis 22 cm). Es sind aber keine Störungen an den Roboterelementen und Tragwerkkonstruktionen durch die zahlreichen (>10) Experimente entstanden. Deshalb kann Folgendes postuliert werden. Der Roboter kann Hindernisse mit einem Sprung überwinden. Der Sprungmechanismus funktioniert, und die Funktionstüchtigkeit des Sprungverfahrens ist bestätigt worden. Der Roboter sollte aber mit einer „sprungfähigen“ Hüllkugel ausgerüstet sein, weil eine weiche Hüllkugel aus Polyvinylchlorid jeden Robotersprung sehr gefährlich macht (Kollision zwischen den Pendelelementen und der Bewegungsoberfläche ist möglich).

Auf Grund der Ergebnisse des Experiments mit dem Robotersprung kann Folgendes postuliert werden. *Der Roboter kann 12-15 cm hohe Hindernisse durch Sprung überwinden. Um diese Möglichkeit hundertprozentig zu sichern, sollte die Hüllkugel des Roboters aus festerem und federndem Stoff hergestellt werden.*

7.2.4. Aufgabe 5: krummlinige Bewegung des Roboters

Der Roboter soll beschleunigen und die weitere Bewegung mit einer konstanten Geschwindigkeit und jeweiliger Änderung der Bewegungsrichtung ausführen. Der Wenderadius muss über 1 m sein.

Die krummlinige Bewegung des Roboters „Saturn“ ist auf dem Bild 7.6 dargestellt. Dieses Bild ist mit Hilfe der Sequence-Kamera aufgenommen. Der Wenderadius bei der Bewegung des Roboters beträgt **0,8 m**. Zweck des Experiments war die Bestimmung der 2D-Trajektorie der Roboterbewegung auf einer gleichmäßig horizontalen Oberfläche

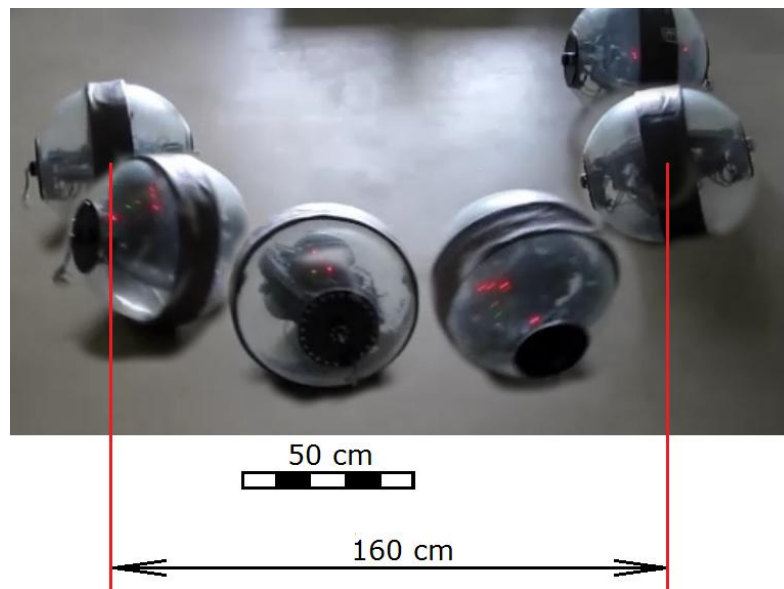


Bild 7.6: Krummlinige Bewegung des Roboters

Auf Grund der Ergebnisse des Experiments mit der krummlinigen Roboterbewegung kann Folgendes postuliert werden. *Der Roboter kann auf einer $2,56 \text{ m}^2$ -Fläche eine Wendung ausführen. Der Wenderadius ist $0,8 \text{ m}$.*

7.2.5. Aufgabe 6: krummlinige Bewegung des Roboters

Der Roboter soll eine Stufe überwinden. Die Höhe des Hindernisses beträgt bis zu 10 cm .

Zweck ist die Prüfung der Möglichkeit des Roboters, kleinere Hindernisse mit Hilfe des Kreiselgeräts zu überwinden.

Die Höhe der Stufe ist **$7,5 \text{ cm}$** . Das Kreiselgerät ist aktiv und entwickelt das Hilfsmoment für die Überwindung des Hindernisses. Die Winkelgeschwindigkeit jedes Kreiselrotors beträgt **$15\,000 \text{ U/min}$** . Die Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrahmens liegt bei **60 U/min** . Der Drehwinkel des Rahmens ist **85°** .

Die Überwindung der Stufe ist auf dem Bild 7.7 dargestellt. Dieses Bild ist mit Hilfe der Sequence-Kamera entwickelt. Die Veränderung des Kreiselrahmendrehwinkels zeigt Bild 7.8.

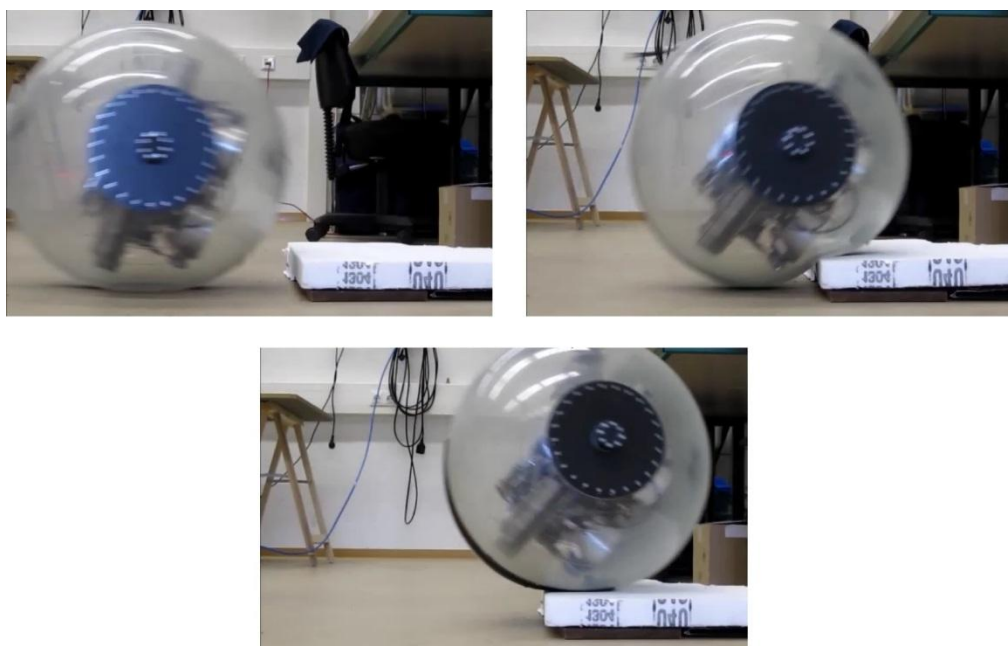


Bild 7.7: Überwindung der Treppe

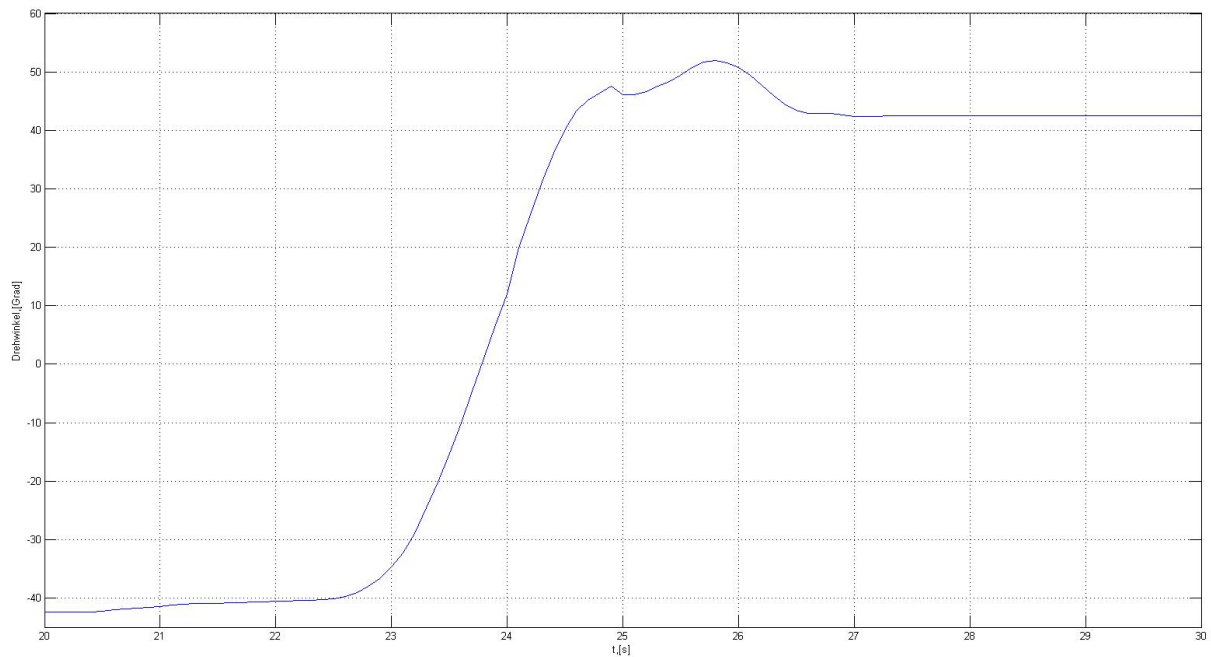


Bild 7.8: Veränderung des Drehwinkels der Kreiselrahmen

Die Veränderung der Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrahmens ist in Bild 7.9 dargestellt.

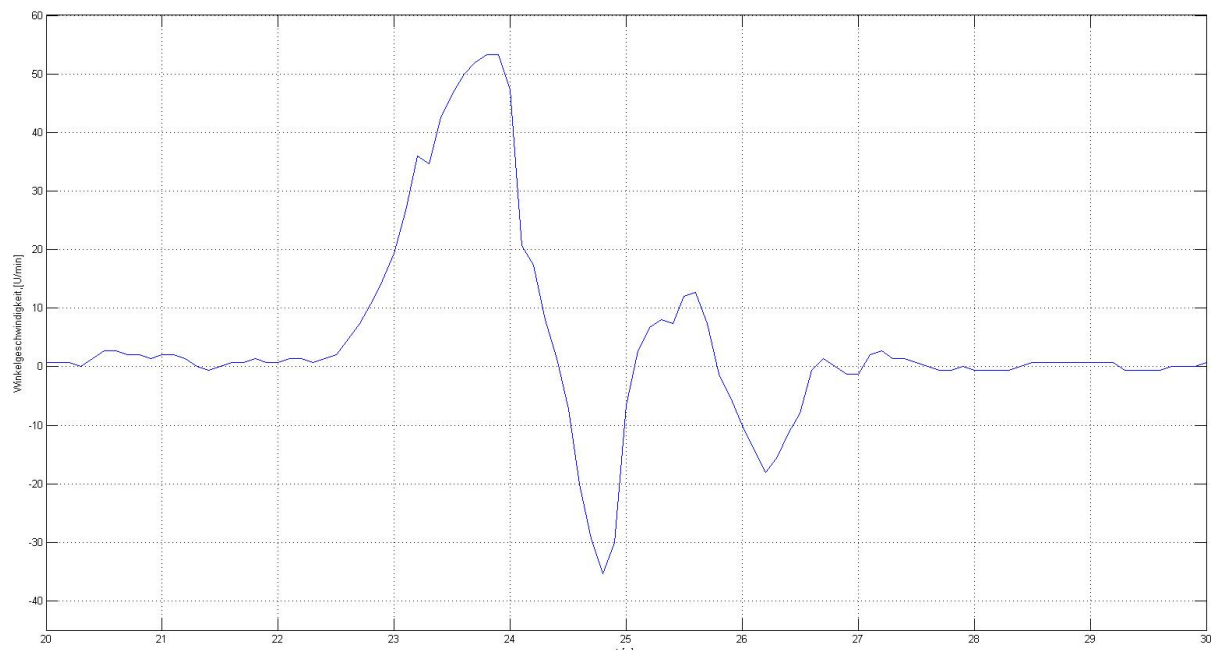


Bild 7.9: Veränderung der Winkelgeschwindigkeit des Kreiselrahmens

Wichtig! Die Drehgeschwindigkeit der Kreiselrotoren und die Winkelgeschwindigkeit der Kreiselrahmen waren zweimal kleiner, als bei der MatLab-Modellierung nach den Sicherheitsanforderungen. Die präzise Steuerung des Drehens des Kreiselrahmens mit der Rahmenwinkelgeschwindigkeit $>65 \text{ U/min}$ ist auch schwer. Hier entsteht die Aufgabe für die Weiterarbeit. Das ist die Verbesserung der Steuerungsalgorithmen.

Auf Grund der Ergebnisse des Experiments mit der Überwindung der Stufe kann Folgendes postuliert werden. *Der Roboter kann mit Hilfe des Kreiselgeräts ein Hindernis bis zum 0,075 m hoch überwinden. Diese Höhe ist nicht maximal, weil die Drehgeschwindigkeit der Kreiselrotoren und die Winkelgeschwindigkeit der Kreiselrahmen kann erhöht werden.*

FAZIT UND MÖGLICHE VERBESSERUNGEN

Im Rahmen dieser Dissertation ist ein neues kinematisches Schema des Kugelroboters mit hoher Gelände- und Manövrierfähigkeit entwickelt worden. Der Roboterprototyp wurde in MatLab/Simulink komplett simuliert, entwickelt und gebaut. Dieser Roboter „SATURN“ verfügt über die Parameter und Möglichkeiten, die nachfolgenden Anforderungen entsprechen:

- Der Roboter kann bis auf eine Geschwindigkeit von 1,25 m/s innerhalb eine Sekunde beschleunigen, besitzt also eine hohe Dynamik. Das Steuerungssystem des Roboters zeichnet sich zudem durch eine einfache Struktur aus.
- Der Roboter hat ein transparentes luftdichtes Gehäuse. Er kann sich auf beliebigem Terrain bewegen (u.a. Gras, Sand, Schnee, Steine). Der Roboter kann auch kleine Wasserhindernisse überwinden (z.B. Rinnsal).
- Der Roboter ist kompakt (der Roboterdurchmesser ist 50 cm), leicht und aus gewöhnlichen Stoffen gebaut. Die Gesamtmasse des Roboters beträgt 20 kg.
- Der Roboter kann Hindernisse bis zu 7,5 cm mit Hilfe des Kreiselgeräts oder bis zu 15 cm mit Hilfe des Sprungmechanismus überwinden.
- Der Roboter besitzt eine Autonomiefähigkeit von bis zu 5 Stunden (ohne aktivem Kreiselgerät).
- Die Hüllkugel des Roboters ist robust gegen äußere Betriebsbelastungen (u.a. Stöße). Durch den halbjährigen aktiven Prozess der Experimente wurde nur ein Set der Hüllkugel inkl. Seitendeckel verwendet.
- Die Komplexität der entwickelten Teile des Roboters wurde auf ein Minimum beschränkt.

Diese Eigenschaften des Roboters wurden durch verschiedene Experimente mit dem Prototyp verifiziert.

Um die Ausführung der Sprungaufgabe zu verbessern, sollte die Hüllkugel aus einem besser geeigneten Werkstoff hergestellt werden. Die Hüllkugel des Roboters „SATURN“ ist aus Polyvinylchlorid hergestellt. Dieser Stoff ist zwar leicht und fest, aber die Verformung beim Pumpen der Hüllkugel erreicht 20° - 25° . Deshalb sind Kollisionen zwischen der Bewegungsfläche und inneren Elementen des Roboters beim Sprung möglich. Um dieses Problem zu beheben, sollte die Hüllkugel ohne Luftdruck verformbar $>(5^{\circ}$ - $10^{\circ})$ sein und aus einem festerem Werkstoff hergestellt werden. Für diesen Zweck muss die Hüllkugel mit dem Reißverschluss als einzelnes Sonderteil konzipiert und gefertigt werden. Allerdings sind Kosten- und Zeitaufwand für diese Hüllkugelbauart relativ hoch.

Damit auch die Drehmöglichkeiten der äquatorialen Führung verbessert werden können, sollte das sphärische Pendel nicht nur um 90° , sondern auch um 180° um die senkrechte Achse rotieren können. Dann kann das Problem der kurzzeitig andauernden Hilfsmomente gelöst werden, und der Roboter würde eine bessere Beschleunigungsmöglichkeit haben, um die höhere Geschwindigkeit in kürzerer Zeit zu erreichen.

Ein neues Steuerungssystem mit verbesserter Steuerungselektronik müsste entwickelt werden, um die vollständigen Möglichkeiten des Kreiselgeräts umzusetzen. Die Drehgeschwindigkeit des Kreiselrahmens sollte erhöht werden, um das entstehende Kreiselmoment zu steigern.

Der entwickelte Roboter kann als Basis für zukünftige Inspektions- und Navigationssysteme betrachtet werden.

LITERATUR

- [1] **Armour R. H., Vincent J. F. V.** *Rolling in nature and robotics: a review*. J. Bionic Eng., 2006, vol. 3, no. 4, pp. 195-208.
- [2] **Suomela J., Ylikorpi T.** *Ball-shaped robots: an historical overview and recent developments at TKK*. In: Field and Service Robotics, STAR25, 2006, pp. 343- 354.
- [3] **Chase R., Pandya A.** *A Review of Active Mechanical Driving Principles of Spherical Robots* // Robotics 2012, 1, 3-23; doi:10.3390/robotics1010003 ISSN 2218-6581 www.mdpi.com/journal/robotics Department of Electrical and Computer Engineering, Wayne State University, 5050 Anthony Wayne Drive, Detroit, MI 48202, USA; E-Mail: apandya@wayne.edu
- [4] *Мобильные роботы: робот-колесо и робот-шар* / **А. В. Борисов, И.С.Мамаев, Ю.Л.Караваяев** (ред.). Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. 532с.
- [5] **Bicchi A., Balluchi A., Prattichizzo D., Gorelli A.** *Introducing the «Sphericle»: An experimental testbed for research and teaching in nonholonomy* // Proc. IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation (Albuquerque, New Mexico, April 21–27, 1997): Vol. 3, pp. 2620–2625.
- [6] **Alves J., Dias J.** *Design and control of a spherical mobile robot* // J. Syst. Control Eng., 2003, vol. 217, pp. 457–467.
- [7] **Halme A., Schonberg T., Wang Y.** *Motion control of a spherical mobile robot* // Proc. of the 4th IEEE Internat. Workshop on Advanced Motion Control (Mie, Japan, 1996): Vol. 1, pp. 259–264.
- [8] **Reina G., Foglia M., Milella A., Gentile A.** *Rough-terrain traversability for a cylindrical shaped mobile robot*. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics. IEEE. New York, USA, p. 148-153.
- [9] **Zhan, Q.; Cai, Y.; Yan, C.** *Design, Analysis and Experiments of an Omni-Directional Spherical Robot*. In Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, May 2011; pp. 4921–4926.
- [10] **Mukherjee R., Minor M. A., Pukrushpan J.T.** *Simple motion planning strategies for spherobot: a spherical mobile robot* // Proc. of the 38th IEEE Conf. on Decision and Control (Phoenix, AZ, Dec 1999): Vol. 3, pp. 2132–2137.
- [11] **Tomik F., Nudehi S., Flynn L. L., Mukherjee R.** *Design, fabrication and control of spherobot: A spherical mobile robot* // J. Intell. Robot. Syst., 2012 (DOI: 10.1007/s10846-012-9652-2).
- [12] **Javadi A., Mojabi P.** *Introducing glory: a novel strategy for an omnidirectional spherical rolling robot* // J. Dyn. Syst. Meas. Control Trans. ASME, 2004, vol. 126, no. 3, pp. 678–683.
- [13] **Batten C., Wentzlaff D.** *Kickbot: A Spherical Autonomous Robot*. Massachusetts Institute of Technology, 2006, <http://www.iiiit.edu/~cbatten/work/kickbot-embint01.pdf>
- [14] **Marek K., Marek W.** *Design and construction of RoBall, a spherical, nonholonomic mobile robot*. INSTYTUT CYBERNETYKI TECHNICZNEJ POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ. Warschau, 2004.
- [15] *Rotundus. Durable mobile robot for outdoor surveillance*. Uppsala University. Angstrom Space Technology Center, 2002; Rotundus. Available online: <http://www.rotundus.se> (accessed on 22 May 2012).

- [16] **Michaud E., Laplante J-F., Larouche H., Duquiette A., Caron S., Letourneau D., Masson P.** Autonomous spherical mobile robot to child development studies. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2005, vol. 35, p. 471-480.
- [17] **Chen W.-H., Chen Ch.-P., Yu W.-Sh., Lin Ch.-H., Lin P.-Ch.** *Design and implementation of an omnidirectional spherical robot Omnicron* // IEEE/ASME Internat. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (Kachsiung, Taiwan, 2012), pp. 719–724.
- [18] **Килин А.А., Караваев Ю.Л., Клековкин А.В.** *Кинематическая модель управления высокоманевренным мобильным сферороботом с внутренней омниколесной платформой* // Нелинейная динамика, 2014, т. 10, №1, с. 113–126.
- [19] **Булгаков Б.В.** *Прикладная теория гироскопов* — Москва, Гостехиздат, 1955.
- [20] **Меркин Д.Р.** *Гироскопические системы*. — Москва, «Наука», 1974, – 344 с.
- [21] **Bhattacharya S., Agrawal S.** *Spherical rolling robot: a design and motion planning studies* // IEEE Trans. Robot. Autom., 2000, vol. 16, no. 6, pp. 835–839.
- [22] **Otani T., Urakubo T., Maekawa S., Tamaki H., and Tada Y.** *Position and attitude control of a spherical rolling robot equipped with a gyro*. In the 9th IEEE International Workshop on Advantaced Motion Control, 2006, pp. 416-421.
- [23] **Jia Q., Zheng Y., Sun H., Cao H., Li H.** *Motion control of a novel spherical robot equipped with a flywheel* // ICIA'09: Internat. Conf. on Information and Automation (Zhuhai, Macau, 2009), pp. 893–898.
- [24] **Joshi V. A., Banavar R. N., Hippalgaonkar R.** *Design and analysis of a spherical mobile robot* // Mech. Mach. Theory, 2010, vol. 45, pp. 130-136.
- [25] **Joshi, V.; Banavar, R.** *Motion analysis of a spherical mobile robot*. Robotica 2010, 27, 343–353.
- [26] **Ishikawa M., Kitayoshi R., Sugie T. Volvot.** *A spherical mobile robot with eccentric twin rotors* // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Biomimetics (Phuket, Thailand, Dec. 7-11, 2011), pp. 1462-1467.
- [27] **Brown H.B.Jr., Xu Y.** *A single-wheel, gyroscopically stabilized robot*. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Minneapolis, MN, USA, 1996, vol. 4, p. 3658-3663.
- [28] **Shu, G.; Zhan, Q.; Cai, Y.** *Motion Control of Spherical Robot Based on Conservation of Aangular Momentum*. In Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2009), Changchun, China, August 2009; pp. 599–604.
- [29] **Qingxuan, J.; Yili, Z.; Hanxu, S.; Hongyu, C.; Hongyi, L.** *Motion Control of a Novel Spherical Robot Equipped with a Flywheel*. In Proceedings of 2009 International Conference on Information and Automation (ICIA'09), Zhuhai/Macau, China, June 2009; pp. 893–898.
- [30] **Peck, M. Low-Power, High-Agility Space Robotics**. In Proceedings of 2005 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, San Francisco, CA, USA, August 2005; pp. 1–12.
- [31] **Schroll, G.** *Dynamic Model of a Spherical Robot from First Pinciples*. M.S. Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA, 2010.
- [32] **Schroll G.** *Design of a spherical vehicle with flywheel momentum storage for high torque capabilities: Dissertation (bachelor of science)*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2008.

- [33] **Schroll G.** *Angular momentum torque enhancement for spherical vehicles.* WO Patent WO/ 2010/057129, May 2010.
- [34] **Chadil, N.; Phadoongsidhi, M.; Suwannasit, K.; Manoonpong, P.; Laksanacharoen, P.** *A Reconfigurable Spherical Robot.* In Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, May 2011; pp. 2380–2385.
- [35] **Kim, Y.; Ahn, S.; Lee, Y.** *KisBot: New Spherical Robot with Arms.* In Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Robotics, Control and Manufacturing Technology, Hangzhou, China, April 2010; pp. 63–67.
- [36] **Artusi, M.; Potz, M.; Aristizabal, J.; Menon, C.; Cocuzza, S.; Debei, S.** *Electroactive elastomeric actuators for the implementation of a deformable spherical rover.* IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2011, 16, 50–57.
- [37] **Wait, K.; Jackson, P.; Smoot, L.** *Self Locomotion of a Spherical Rolling Robot Using a Novel Deformable Pneumatic Method.* In Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Anchorage, AK, USA, May 2010; pp. 3757–3762.
- [38] **Sugiyama Y., Hirai S.** *Crawling and jumping by a deformable robot.* IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Sendai, Japan, 2004, vol. 4, p. 3276-3281.
- [39] **Sugiyama Y., Hirai S.** *Crawling and jumping by a deformable robot // Int. J. Robot. Res., 2006, vol. 25, pp. 603–620.*
- [40] **Armour R., Paskins K., Bowyer A., Vincent J., Megill W.** *Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain.* Bioinspiration Biomimetics 2, 2007, pp. 65-82.
- [41] **Armour R.** *A Biologically Inspired Jumping and Rolling Robot : Dissertation (doctor of philosophy),* University of Bath, Department of Mechanical Engineering, May 2010
- [42] **Li, B.; Deng, Q.; Liu, Z.** *A Spherical Hopping Robot for Exploration in Complex Environments.* In Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Guilin, China, December 2009; pp. 402–407.
- [43] **Яблонский А.А.** *Курс теоретической механики.* – М.: Высшая школа, – ч.2, – 1971. – 487 с.
- [44] **Бондаренко А.А., Дубінін О.О., Переяславцев О.М.** *Теоретична механіка.* – Київ: Знання, – ч.2, – 2004. – 590 с.
- [45] **Неймарк Ю.И., Фуфаев Н.А.** *Динамики неголономных систем.* – М.: Наука, 1967. – 519 с.
- [46] **Бутенин Н.В., Фуфаев Н.А.** *Введение в аналитическую механику.* – М.: Наука, 1991. – 256 с.
- [47] **Колесников С.Н.** *О качении диска по горизонтальной плоскости / Вестник Московского ун-та, сер.1. — Математика. Механика. — 1985, №2, С. 55-60.*
- [48] **Мартыненко Ю.Г., Ленский А.В., Кобрин А.И.** *Декомпозиция задачи управления мобильным одноколесным роботом с невозмущаемой гиросtabilizovannoy платформой / Доклады Академии Наук, 2002, т.386, №6. С.767-769.*
- [49] **Голубева О.В.** *Теоретическая механика.* — М.: Высшая школа, 1976. – 350 с.
- [50] **Лурье А.И.** *Аналитическая механика.* – М.: ГИФМЛ, 1961. – 824 с.

- [51] **Гантмахер Ф.Г.** *Теория матриц*. – М.: Наука, 1967. – 576 с.
- [52] **Бобылев Д. К.** *О шаре с гироскопом внутри, катящемся по горизонтальной плоскости без скольжения* // Матем. сб., 1982, т. 16, вып. 3, с. 544-581.
- [53] **Чаплыгин С.А.** *О катании шара по горизонтальной поверхности* // Матем. сб. 1903, т.24, С.139-168 (см. также: Чаплыгин С.А. Собр. соч., т.1. – М.-Л.: ОГИЗ, 1948. С.76-101; Чаплыгин С.А. Избр. труды. – М.: Наука, 1978. С.409-428).
- [54] **Мошук Н.К.** *О движении шара Чаплыгина по горизонтальной плоскости* // Приклад. Математика и Механика, 1983, т.47, №6. С.916-921.
- [55] **Маркеев А. П.** *Об интегрируемости задачи о качении шара с многосвязной полостью, заполненной идеальной жидкостью* // Механика Твёрдого Тела, 1986, т. 21, № 1, с. 64-65.
- [56] **Борисов А.В., Мамаев И.С.** *Качение неоднородного шара по сфере без скольжения и верчения* // Нелинейная динамика, 2006, т. 2, №4, с. 445-452.
- [57] **Москвин А. Ю.** *Шар Чаплыгина с гироскопом: Особые решения* // Нелинейная динамика, 2009, т. 5, № 3, с. 345-356.
- [58] **Болсинов А.В., Борисов А.В., Мамаев И.С.** *Качение без верчения шара по плоскости: отсутствие инвариантной меры в системе с полным набором интегралов* // Нелинейная динамика, 2012, т.8, №3, с.605-616.
- [59] **Борисов А.В., Мамаев И.С., Трещев Д.В.** *Качение твёрдого тела без проскальзывания и верчения: кинематика и динамика* // Нелинейная динамика, 2012, т.8, №4, с.783-797.
- [60] **Борисов А.В., Мамаев И.С., Бизяев И.А.** *Иерархия динамики при качении твёрдого тела без проскальзывания верчения по плоскости и сфере* // Нелинейная динамика, 2013, т.9, №2, с.141-202.
- [61] **Sheng Ju Sang, Ding Shen, Ji Chao Zhao, Jia Yang Hu, Qi An**, *Analysis and Simulation of a Spherical Robot*. Advanced Material Research Vols. 171-172 () pp. 748-751. Trans Tech Publications, Switzerland, 2011.
- [62] **Shao Jun Ma**, *The Design of Two Pendulums Spherical Robot*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 312, pp. 741-744 Trans Tech Publications, Switzerland, 2013.
- [63] **Lunc J.L.** *Vvedeniye v teoriyu giroskopov/Introduction to analysis of gyroscopes*, Moscow, Nauka, 1972.
- [64] **Dip Narayan Ray** Surface Robotics Laboratory CSIR – Central Mechanical Engg. Research Institute Durgapur 713209, India *Design and Development of a Spherical Robot (SpheRobot)*, Papers of NACOM Conference 2013, S. 735-741
- [65] **Vincent A.** *A Literature Review on the Design of Spherical Rolling Robots*. Crossley Department of Mechanical Engineering Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 1521
- [66] **Shaoping Bai, Michael R. Hansen** *Modelling of a Spherical Robotic Wrist with Euler Parameters*, Department of Mechanical Engineering Aalborg University, Denmark
- [67] **Jerry Pratt, Peter Dilworth, Gill Pratt**, *Virtual Model Control of a Bipedal Walking Robot* MIT Leg Laboratory, Cambridge, MA 02139 <http://www.ai.mit.edu/projekts/leglab/> ICRA 1997
- [68] **Jung-Yup Kim, Ill-Woo Park and Jun-Ho Oh** *Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor* HUBO Laboratory, Humanoid Robot Research Center, Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of

- Science and Technology, 373-1 Guseong-dong Yuseong-gu, Daejeon 305-701, South Korea, 2008
- [69] **Steven H. Collins, Martijn Wisse, Andy Ruina** *A Three-Dimensional Passive-Dynamic Walking Robot with Two Legs and Knees*. Mechanical and Aerospace Engineering Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA
- [70] **Marc Raibert, Kevin Blankespoor, Gabriel Nelson, Rob Playter and the BigDog Team** *BigDog, the Rough-Terrain Quaduped Robot*. Boston Dynamics, Waltham, MA 02451 USA (Tel: 617-868-5600; e-mail: mxr@BostonDynamics.com).
- [71] **Jung-Yup Kim, Ill-Woo Park and Jun-Ho Oh**, Design and Walking Control of the Humanoid Robot, KHR-2(KAIST Humanoid Robot - 2), Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea/Papers of conference CCAS 2004, August 25-27, The Shangri-La Hotel, Bangkok, THAILAND, 2004
- [72] **Qiang Huang, Kazuhito Yokoi, Shuuji Kajita, Kenji Kaneko, Hirohiko Arai, Noriho Koyachi, Kazuo Tanie**, *Planning Walking Patterns for a Biped Robot* IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL. 17, NO. 3, JUNE 2001
- [73] **R. Grammel**: *Der Kreisel. Seine Theorie und seine Anwendungen. Band I*. Springer-Verlag, Berlin, 1950.
- [74] **R. Grammel**: *Der Kreisel. Seine Theorie und seine Anwendungen. Band II*. Springer-Verlag, Berlin, 1950.
- [75] **Ю.Г. Мартыненко, А.М. Формальский**: *Проблемы управления неустойчивыми системами*. 2005./**J.G. Martinenko, A.M. Formalskiy** *Problemi upravlenija neustoichivimi sistemami* 2005
- [76] **F. Klein, A. Sommerfeld**: *Über die Theorie des Kreisels*, B. G. Teubner, 1910.
- [77] **Малеев П.И.**: *Новые типы гироскопов*. Л., «Судостроение», 1971/ **Maleev P.I.** *Novije tipi giroskopov*, L, «Sudostrojenije», 1971
- [78] **Brandl, Helmut**: *Schwingungs- und Stabilitätsanalyse für flüssigkeitsgefüllte Kreisel*. Fortschr.- Ber. VDI Reihe 11 Nr. 82. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.
- [79] **LIT Motors Gyrocar C-1** <http://litmotors.com/c-1>
- [80] **D. Toal, C. Flanagan, C. Jones, B. Strunz**: *Subsumption architecture for the control of robots*, Berlin, 1996.
- [81] **Goodwin G. C., Graebe S.F., Salgado M. E.** Control System Design : P.ce H.II, 2000.
- [82] **Gheorghe SAMOILESCU, Serghei RADU, Naval Academy** *STABILISERS AND STABILISING SYSTEMS ON SHIPS* “Mircea cel Batran”, Constantza, 2002
- [83] **HAMED HAGHIGHI, MOHAMMAD REZA JAHED-MOTLAGH** *SHIP ROLL STABILIZATION VIA SLIDING MODE CONTROL AND GYROSTABILIZER*, Electrical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, 2013
- [84] **Stephen C. Stephen C. Spry, Anouck R. Girard** *Gyroscopic Stabilization of Unstable Vehicles: Configurations, Dynamics, and Control*, March 31, 2008
- [85] **H. Benjamin Brown, Yangsheng Xu** *A Single-Wheel Gyroscopically Stabilized Robot*, IEE Robotics and Automation Magazine, September 1997.
- [86] **S. Pieper**: *Sensoren und Aktoren von autonomen Robotern*, Hasbergen, 2007.

- [87] **K.Kondak**: *Bewegungsplanung und –optimierung in der Robotik*, Berlin, 2002.
- [88] **J.Ziegler**: *Evolution von Laufrobotersteuerungen mit Genetischer Programmierung*, Dortmund, 2003.
- [89] **Juan David Hernández, David Sanz, Gonzalo R. Rodríguez-Canosa, Jorge Barrientos, Jaime del Cerro, and Antonio Barrientos**. *Sensorized robotic sphere for large exterior critical infrastructures supervision*. Centre for Automation and Robotics, Universidad Politécnica de Madrid-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, Spain, 2013
- [90] **Jean-François Laplante**. *Étude de la dynamique d'un robot sphérique et de son effet sur l'attention et la mobilité de jeunes enfants*. Faculté de génie, Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke (Québec, Canada), 2004, 143 S.
- [91] **Safonov, V. Bilous, U. Schmucker**. *Design of an All-Terrain Spherical Jumping Robot with High-Dynamic Motion*. CLAWAR 2014 The 17th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Poznan, Poland July 21 – July 23, 2014
- [92] **Анурьев В.И.** *Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х томах. 9-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И. Н. Жестковой. - М.: Машиностроение, 2006. - 928 с.: ил.*