

Konstruktion einer automatischen Aufrolleinrichtung für ein pneumatisch betriebenes Jojo

Studienarbeit

im Fachbereich Bionik und Evolutionsstrategie an der
Technischen Universität Berlin

Tobias Jahnz

Erstprüfer: xxx

Zweitprüferin: xxx.

Bearbeitungszeitraum: tt. Monat Jahr bis tt. Monat Jahr

Berlin, September 2003

Kurzfassung

Gegenstand der Arbeit ist die Weiterentwicklung eines Jojos, das mit einem fluidischen Muskel der Firma FESTO© angetrieben wird. Der Aufbau dient zur Veranschaulichung der Funktionsweise dieser pneumatischen Aktuatoren. Er ist so konzipiert, dass er einfach transportiert und beispielsweise als Demonstrationsobjekt auf Messen eingesetzt werden kann. Die Weiterentwicklung umfasst Konzeption, Auslegung und Konstruktion einer Aufrollautomatik sowie die Implementierung der elektronischen Steuerung für den Betrieb und die Neukonstruktion des Gehäuses. In der vorliegenden schriftlichen Ausarbeitung enthalten sind Auslegungsberechnungen zur Mechanik des Jojos, Konzeption der Wickelautomatik, Auslegungsberechnungen für die einzelnen Elemente und Fertigungsanweisungen für die mechanischen Komponenten. Die Aufrollautomatik ermöglicht es, autonom eine Evolutionsstrategie zur Optimierung der Steuerzeiten des Muskels laufen zu lassen.

Schlagwörter: Fluidische Muskeln, Jojo

Abstract

The enhancement of a fluidic muscle pneumatic Yoyo driven by traded by FESTO© is being presented. The Yoyo serves as a demonstrating object for the function of these pneumatic actuators. The chosen concept aims for easy assembly and transport to fairs and exhibitions. The enhancement comprises a new construction of the housing, conception and design of a winding equipment, which makes it possible to start the yoyo automatically, and implementation of an electronic control. In this thesis, equations for the calculation of the yoyo's mechanical properties as well as design calculations for all components and manufacturing instructions are being given. The winding equipment offers the possibility to run an autonomous evolution strategy in order to optimize the muscle control.

Keywords: fluidic muscles, yoyo

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis.....	7
Vorwort	10
1 Analytische Untersuchungen	11
1.1 Modellierung des Jojos	11
1.2 Bewegungsfunktion des Jojos.....	12
1.3 Reibungsverluste.....	13
1.3.1 Messbarkeit der Reibungsverluste	13
1.3.2 Berechnung von Reibungsverlusten	13
1.3.3 Reibungsverluste pro Periode	13
1.4 Bewegungsfunktion im Unteren Totpunkt.....	14
1.4.1 Parameterstudie zu Fallhöhe und Achsdurchmesser.....	15
1.5 Energiezufuhr.....	17
1.5.1 Einfacher Ansatz.....	17
1.5.2 Berechnung der Zugeführten Energie	19
1.6 Gestaltungsempfehlungen.....	19
2 Anforderungskatalog.....	20
2.1 Problemstellung	20
2.2 Anforderungen	20
3 Konzeption.....	21
3.1 Grundkonzepte.....	21
3.1.1 Vorauswahl	22
3.1.2 Entscheidungsmatrix.....	23
3.1.3 Entscheidung.....	23
3.2 Funktionsprinzip der Aufrollautomatik	24
3.3 Ablaufplan beim Aufwickeln des Jojos	25
3.4 Berechnung der auftretenden Kräfte beim Aufwickeln	26
3.4.1 Freischnitt	26

3.4.2	Aufstellen von Kräfte- und Momentengleichgewicht.....	27
3.5	Konzeption der Steuerung.....	29
3.5.1	Benötigte Sensoren	30
3.5.2	Aktive Elemente.....	30
3.5.3	Spannungsversorgung	30
3.5.4	Steuerungsgerät.....	31
4	Auslegung der Module.....	32
4.1	Übernommene Bauteile	32
4.1.1	Maxwellrad	32
4.1.2	Muskel.....	32
4.1.3	Ventil.....	33
4.1.4	Abstandssensor	33
4.1.5	Seil	33
4.1.6	Führungsseil.....	34
4.1.7	Einspannung.....	34
4.2	Die Linearführung.....	34
4.2.1	Abschätzung der Belastungen.....	34
4.2.2	Auswahl	35
4.3	Der Wickelantrieb.....	36
4.4	Der Antrieb der Linearführung	36
4.4.1	Aufrollen des Rades	36
4.4.2	Zurückfahren des Schlittens.....	37
4.4.3	Auswahl eines passenden Antriebs.....	38
4.5	Das Gestell	41
4.5.1	Beschreibung der ausgeführten Konstruktion.....	41
4.6	Der Schlitten	41
4.7	Die Entlagensensoren.....	42
4.8	Die Steuerelektronik	42
5	Fertigung und Zusammenbau	43
5.1	Das Maxwellrad und seine Aufhängung.....	43
5.1.1	Das Maxwellrad	43
5.1.2	Aufhängung am Muskel.....	43
5.1.3	Befestigung des Fadens an der Achse.....	43
5.1.4	Probleme	44
5.2	Das Gestell.....	44
5.2.1	Zusammenbau	45
5.3	Schlitten	46
5.4	Die Linearführung.....	47

5.5	Der Muskel.....	48
5.6	Das Führungsseil.....	48
5.7	Anschlüsse	49
5.8	Anleitung zur Fertigung.....	50
5.8.1	Kostenabschätzung	50
5.8.2	Zeitabschätzung	51
5.8.3	Der Weg zum eigenen Jojo	51
	Literaturverzeichnis.....	53

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Bewegung des Jojos zwischen den Totpunkten	11
Abb. 2: Maximale Beschleunigung des Jojos in UT in Abhängigkeit von Achsdurchmesser r und Fallhöhe h	16
Abb. 3: Ausschnittsvergrößerung von Abb. 2, graphische Ermittlung des kritischen Achsenradius	17
Abb. 4: Verdeutlichung der Analogie zwischen der Energiezufuhr beim Tischtennis durch den Schläger (links) und beim Jojo durch die Kontraktion des Muskels (rechts)	18
Abb. 5: Reibrad Grundkonzept	21
Abb. 6: Mechanisches Grundkonzept mit passivem Heben des Antriebs durch die Aufwärtsbewegung des Jojos	22
Abb. 7: Weitere Grundkonzepte mit Riementrieb oder Druckluft	22
Abb. 8: Freischnitt des Jojos beim Aufrollen	26
Abb. 9: Verlauf der Normalkraft F_N , der Seilkraft S und der Lagerkraft F_Y bei variablem Angriffswinkel α für verschiedene Gleitreibungskoeffizienten μ	28
Abb. 10: Skizze des Konzepts mit den wichtigsten Bauteilen	29
Abb. 11: Konzept der Steuerungselektronik	31
Abb. 12: Kräfte und Momente auf die Linearführung	35
Abb. 13: Reale Drehzahlkennlinie des gewählten Antriebs bei 24 V Betriebsspannung	40
Abb. 14: Reale Drehzahlkennlinie des gewählten Antriebs bei 9 V Betriebsspannung	40
Abb. 15: Das Fadenende wird durch den Schlitz gezogen und dann in einer Schlaufe um die Achse gelegt.	44

Abkürzungsverzeichnis

Liste der verwendeten Abkürzungen

OT	Oberer Totpunkt des Jojos
UT	Unterer Totpunkt des Jojos
MMP	Massenmittelpunkt
FM	Fluidischer Muskel

Liste der Formelzeichen

a_{max}	= Maximale Beschleunigung des Jojos im unteren Totpunkt
$a_{UT}(t)$	= Beschleunigung des Jojos im unteren Totpunkt
c_w	= Luftwiderstandsbeiwert
E_{ges}	= Summe aus potentieller und kinetischer Energie des Jojos
E_{gewinn}	= Energiegewinn durch Muskeleinsatz
E_{kin}	= kinetische Energie des Jojos
$E_{kin.1}$	= kinetische Energie des Jojos vor UT
$E_{kin.2}$	= kinetische Energie des Jojos nach UT
E_{pot}	= potentielle Energie des Jojos
$E_{verlust}$	= durch Luftreibung verursachte Verlustenergie
F_N	= Normalkraft
F_R	= Reibkraft
$F_{UT}(t)$	= Durch die Beschleunigung des Jojos verursachte Kraft
$F_{verlust}$	= Widerstandskraft durch Luftreibung
F_y	= Lagerkraft an der Achse
G	= Gewichtskraft des Maxwellrads
G_{ges}	= vereinigte Gewichtskraft von Schlitten und Maxwellrad
g	= Erdbeschleunigung
h	= vertikale Höhendifferenz zwischen UT und OT
$h_{führung}$	= Hub der Linearführung
J	= Massenträgheitsmoment

M_{ab}	= benötigtes Antriebsmoment beim zurückfahren
M_{auf}	= benötigtes Drehmoment des Linearführungsantriebs bei der Aufwärtsbewegung
M_y	= Moment um die y-Achse der Linearführung
$M_{verlust}$	= Verlustmoment des Riementriebs
M_{reib}	= Lastmoment des Wickelmotors
m	= Masse des Jojos
$m_{führung}$	= Masse der Führung
$n_{ab..min}$	= benötigte Drehzahl des Linearführungsantrieb beim Zurückfahren
$n_{an..max}$	= maximal mögliche Drehzahl des Linearführungsantrieb beim Aufwickeln
n_{reib}	= Drehzahl des Wickelantriebs
R	= Außendurchmesser des Jojos
R_{reib}	= Radius des Reibrads
r	= Achsradius des Jojos
r_{max}	= maximal zulässiger Achsradius des Jojos
r_{riemen}	= Radius der Zahnräder des Riementriebs
S	= Seilkraft
s	= allgemeine Streckenkoordinate
T	= Periodendauer einer Jojobewegung
t	= Zeitkoordinate
v	= Geschwindigkeit des Jojos in z-Richtung
v_l	= Geschwindigkeit des Jojos in z-Richtung kurz vor dem unteren Totpunkt
v_{max}	= Maximalwert der Geschwindigkeit des Jojos im unteren Totpunkt
v_{umfang}	= Umfangsgeschwindigkeit des Reibrads
$v_{auf.max}$	= Maximal mögliche Aufwärtsgeschwindigkeit des Jojos beim Wickeln
$v_{UT}(t)$	= Geschwindigkeit des Jojos im unteren Totpunkt
w	= Geschwindigkeit der Muskelkontraktion
z	= Ortskoordinate des Jojos
$z_{UT}(t)$	= Ortskoordinate in Abhängigkeit von der Zeit im unteren Totpunkt

α	= Eingriffswinkel des Reibrads
$\Delta E_{\text{Verlust}}$	= Verlustenergie pro Periode des Jojos
Δz_{OT}	= Höhendifferenz von OT zwischen zwei Periodendurchläufen
μ	= Gleitreibungskoeffizient
ω	= Winkelgeschwindigkeit des Jojos
ϕ	= Winkelkoordinate des Jojos
ω_{max}	= Maximalwert der Winkelgeschwindigkeit des Jojos

Vorwort

Am Fachgebiet für Bionik und Evolutionsstrategie der TU Berlin wird über Anwendungen fluidischer Muskeln (nachfolgend FM genannt) in der Robotik in Kooperation mit dem Hersteller FESTO geforscht. Die FM sind eine neue Art pneumatischer Aktuatoren. Im Gegensatz zu Pneumatikzylindern, ziehen sich die FM bei einer Druckbeaufschlagung zusammen, dabei werden höhere Kräfte erreicht als mit Zylindern gleichen Durchmessers, und dies bei einem wesentlich geringeren Gewicht des Aktuators. Allerdings beträgt die Kontraktion nur etwa 20% der Gesamtlänge des FM, und es können nur Zugkräfte ausgeübt werden. Daher müssen in der Regel zwei FM als Antagonisten paarweise gegeneinander arbeiten, wenn eine Kinematik mit reversiblen Bewegungen realisiert werden soll.

Laufende Forschungsvorhaben des Fachgebiets für Bionik und Evolutionsstrategie beschäftigen sich mit folgenden Themen:

- Konstruktion und Steuerung eines dem menschlichen Arm nachempfundenen Roboters
- Adaptiver Lageregelung FM ausgerüsteter Kinematiken
- Optimierung der Steuerung eines auf FM basierenden Rohrinspektionsroboters

Das Jojo dient zur Veranschaulichung der Funktionsweise von FM auf Messestände und soll potenzielle Kunden mit der Technik vertraut machen. Gleichzeitig sollen auf dem Jojo die Möglichkeiten der evolutionsstrategischen Optimierung von Reglern demonstriert werden.

1 Analytische Untersuchungen

In diesem Kapitel wird die Bewegungsfunktion eines Jojos hergeleitet. Es wird besonderes Augenmerk auf die Verhältnisse im unteren Totpunkt (UT) gelegt, weil hier die Belastungen des Seils, in Folge der ruckartigen Beanspruchung, am höchsten sind. Da das Seil empfindlich auf solche Belastungen reagiert, wird angestrebt eine möglichst sanfte Bewegung in UT sicherzustellen. Darüber hinaus werden Ansätze zur Berechnung der Energiezufuhr durch den Muskeleinsatz präsentiert. Aus diesen Untersuchungen werden Gestaltungsempfehlungen für das Jojo und Empfehlungen für den Muskeleinsatz abgeleitet.

1.1 Modellierung des Jojos

Bei der Modellierung des Jojos wird im Folgenden vereinfachend angenommen, dass sowohl Seil als auch Muskel masselose, starre Körper sind.

In der Realität sind Seil und Muskel keine starren Körper, sondern weisen elastisches Verhalten und Dämpfungseigenschaften auf. Es wird jedoch angenommen, dass diese für den Betrieb des Jojos keine Rolle spielen. Die niedrigste Eigenfrequenz von Muskel und Seil liegt um Größenordnungen höher als die Frequenz der Auf- und Abbewegung des Jojos im normalen Betrieb. Daher wird es keine Probleme durch angeregte Schwingungen geben; Schwingungen, die durch den Ruck in UT entstehen, haben genug Zeit um abzuklingen, bevor das Jojo erneut UT erreicht.

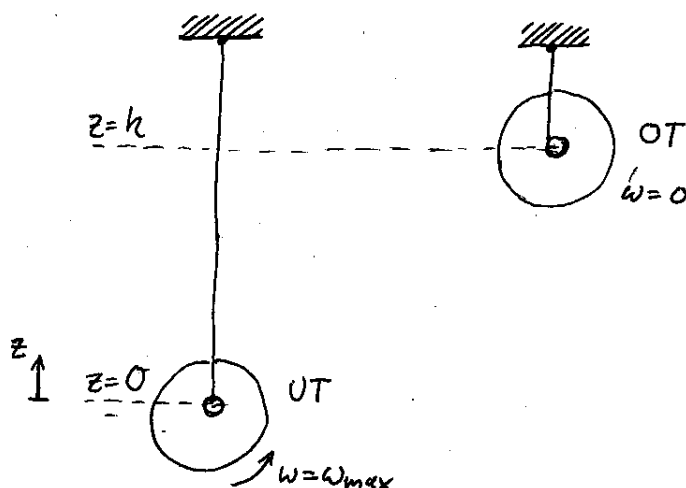


Abb. 1: Bewegung des Jojos zwischen den Totpunkten

1.2 Bewegungsfunktion des Jojos

Verzichtet man in erster Näherung auf die Betrachtung von UT, entspricht die Bewegung des Massenmittelpunkts (MMP) des Jojos einer linearen gleichmäßig beschleunigten Bewegung in z -Richtung und einer gleichmäßig beschleunigten Rotation um die Symmetrieachse.

Die Herleitung der Bewegungsgleichung des Jojos erfolgt unter Anwendung des Energiesatzes. Die Energie des Systems teilt sich auf in einen potentiellen Anteil E_{pot} und einen kinetischen Anteil E_{kin} .

Die Summe aus potentieller und kinetischer Energie E_{ges} ist immer konstant, sie entspricht der potentiellen Energie im oberen Totpunkt (OT) bzw. der kinetischen Energie in UT.

$$E_{ges} = mgh \quad (1.0)$$

$$E_{pot} = mgz \quad (1.1)$$

$$E_{kin} = mg(h - z) \quad (1.2)$$

mit m = Masse des Jojos (in kg)

g = Erdbeschleunigung (in m s^{-1})

z = vertikale Position des Jojos von UT gemessen (in m)

h = vertikale Höhendifferenz zwischen UT und OT (in m)

E_{kin} teilt sich in einen translatorischen Anteil E_{trans} und einen rotatorischen Anteil E_{rot} auf.

$$E_{kin} = E_{trans} + E_{rot} \quad (1.3)$$

$$E_{trans} = \frac{m}{2} v^2 \quad (1.4)$$

$$E_{rot} = \frac{J}{2} \omega^2 \quad (1.5)$$

mit v = Geschwindigkeit des Jojos in z -Richtung (m s^{-1})

ω = Winkelgeschwindigkeit des Jojos (s^{-1})

J = Massenträgheitsmoment (kg m^{-2})

Die Variablen v und ω sind direkt proportional und lassen sich über den Achsenradius r ineinander überführen

$$v = r\omega \quad (1.6)$$

Einen Ausdruck für v in Abhängigkeit von der Koordinate z ergibt sich durch Einsetzen von (1.4) und (1.5) in (1.2) unter Berücksichtigung der Zwangsbeziehung (1.6).

$$v = \sqrt{\frac{mg(h-z)}{\frac{m}{2} + \frac{J}{2r}}}, \omega = \sqrt{\frac{mg(h-z)}{\frac{mr}{2} + \frac{J}{2}}} \quad (1.7)$$

1.3 Reibungsverluste

1.3.1 Messbarkeit der Reibungsverluste

Das Jojo gibt durch Reibung ständig Energie in Form von Luftbewegung und Wärme an die Umgebung ab. Der Betrag der Verlustenergie pro Periode $\Delta E_{\text{Verlust}}$ lässt sich durch die Höhendifferenz von OT zwischen zwei Periodendurchläufen Δz_{OT} bestimmen.

$$\Delta E_{\text{Verlust}} = mg\Delta z_{OT} \quad (1.9)$$

1.3.2 Berechnung von Reibungsverlusten

Die Luftreibung eines Körpers nimmt in der Regel mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zu [2].

$$F_{\text{Verlust}} = \frac{c_w}{2} v^2 \quad (1.10)$$

mit: c_w = Luftwiderstandsbeiwert des Jojos

Die Verlustenergie ergibt sich durch Integration der Widerstandskraft F_{Verlust} über die zurückgelegte Strecke s .

$$E_{\text{Verlust}} = \int_{s.1}^{s.2} \frac{c_w}{2} v(s)^2 ds \quad (1.11)$$

Weiterhin gilt:

$$v(t) = \frac{ds}{dt} \quad (1.12)$$

$$\Leftrightarrow ds = v(t)dt \quad (1.13)$$

Substitution von ds ergibt:

$$E_{\text{Verlust}} = \int_{t.1}^{t.2} \frac{c_w}{2} v(t)^3 dt \quad (1.14)$$

1.3.3 Reibungsverluste pro Periode

Die Reibungsverluste pro Periode nehmen proportional zur Periodendauer der Jojobewegung T zu, da während dieser Zeit ständig Energie dissipiert wird, ohne dass es eine Möglichkeit gibt wieder „nachzutanken“.

Also wird ein kleiner Achsdurchmesser, der dazu führt, dass sich das Jojo pro Periode öfter um die eigene Achse dreht und länger zum Durchlaufen der Fallhöhe braucht, höhere Energieverluste verursachen. Es ist weiterhin zu bedenken, dass die Umfangsgeschwindigkeit, die durch die Rotation des Jojos verursacht wird zur dritten in die Reibungsverluste eingeht. Schaut man sich Gleichung (1.7) an, ist zu erkennen, dass sich v proportional zur Wurzel von r verhält und dass sich ω und somit die Umfangsgeschwindigkeit des Jojos umgekehrt proportional zur Wurzel von r verhalten.

Die Umfangsgeschwindigkeit ist stets um $\frac{R}{r}$ höher als v , sie spielt daher ihr gegenüber die entscheidende Rolle bei den Reibungsverlusten. Außerdem verkürzt sich T , wenn v steigt, was sich positiv auf die Energiezufuhr auswirkt.

Schließlich ist noch der Einfluss des Verhältnis $\frac{J}{m}$ für die Energieverlust zu nennen. Eine Erhöhung von J bei gleich bleibendem m senkt gleichwohl v und ω , was wiederum die Reibungsverluste verringert.

Letztlich hat natürlich auch das Oberflächen-Massen-Verhältnis des Jojos einen Einfluss auf die Verluste. Eine dünne Scheibe hat in OT aufgrund ihrer geringen Masse eine niedrige potentielle Energie, bietet aber viel Angriffsfläche für Luftreibung! Idealerweise hat das Jojo ein hohes Verhältnis von m zur Oberfläche. Dies ist durch ein möglichst dichtes Material zu erreichen.

1.4 Bewegungsfunktion im Unteren Totpunkt

Die Geschwindigkeit des Jojos sei in UT konstant, v und ω haben ihre Maximalwerte v_{max} und ω_{max} erreicht. Das Jojo wird hier nicht mehr gleichmäßig vom Seil abgewickelt sondern bleibt am Einfädelungsloch A hängen. Das Einfädelungsloch fungiert nun als Lager, dass mit der Eigendrehung des Jojos auf einer Kreisbahn um die Achse herumgeführt wird.

Geht man davon aus, dass sich das Jojo aufgrund seiner Trägheit nur in z -Richtung bewegt und A vertikal am abgewickelten Seil bewegt wird, ergibt sich für die Position des Jojos $z_{UT}(t)$:

$$z_{UT}(t) = -r \sin(\varphi) \quad \text{für } \varphi = 0.. \pi \quad (1.15)$$

mit $\varphi = \omega_{max} t$

Durch Ableitung von (1.9) nach der Zeit erhält man die Geschwindigkeit v_{UT}

$$v_{UT}(t) = \dot{z}_{UT}(t) = -r \omega_{max} \cos(\varphi) \quad \text{für } \varphi = 0.. \pi \quad (1.16)$$

Die Ableitung der Geschwindigkeit liefert schließlich die Beschleunigung in UT.

$$a_{UT}(t) = \ddot{z}_{UT}(t) = -r \omega_{max}^2 \sin(\varphi) \quad \text{für } \varphi = 0.. \pi \quad (1.17)$$

Aus der Beschleunigung lässt sich dann die Seilkraft $F_{UT}(t)$ bestimmen:

$$F_{UT}(t) = ma_{UT}(t) = m\ddot{z}_{UT}(t) = -mr\omega_{\max}^2 \cos(\varphi) \quad \text{für } \varphi = 0.. \pi \quad (1.18)$$

Aus dem Maximalwert der Beschleunigung a_{\max} lässt sich die maximale Seilkraft durch Einsetzen von (1.7) bestimmen.

$$a_{\max} = -r\omega_{\max}^2 = -r \frac{mg(h-z)}{\frac{mr}{2} + \frac{J}{2}} \quad (1.19)$$

$$F_{\max} = ma_{\max} = -mr \frac{mg(h-z)}{\frac{mr}{2} + \frac{J}{2}} \quad (1.20)$$

Die Gleichungen gelten nur wenn a_{\max} kleiner g ist, sonst schlägt das Seil schneller um, als das Jojo der Bewegung folgen kann. Das Jojo ginge dann kurzzeitig in den freien Fall über und beim erneuten Anziehen des Seils würde das zu einem starken Ruck im Seil führen.

1.4.1 Parameterstudie zu Fallhöhe und Achsdurchmesser

Die Verhältnisse in UT sind von den konstruktiven Parametern des Jojos, sowie von der Fallhöhe abhängig. Es wird der Einfluss von Fallhöhe und Achsendurchmessers auf die Bewegung des Jojos untersucht. Dies geschieht unter Anwendung von (1.17).

Für das vorhandene Jojo wurden folgende Parameter bestimmt:

$$m = 0,4 \text{ kg}$$

$$R = 0,06 \text{ m}$$

$$J = \frac{mR^2}{2} = 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$$

In Abb.2 sind die maximalen Beschleunigungen für variable Achsendurchmesser und verschiedenen Fallhöhen dargestellt.

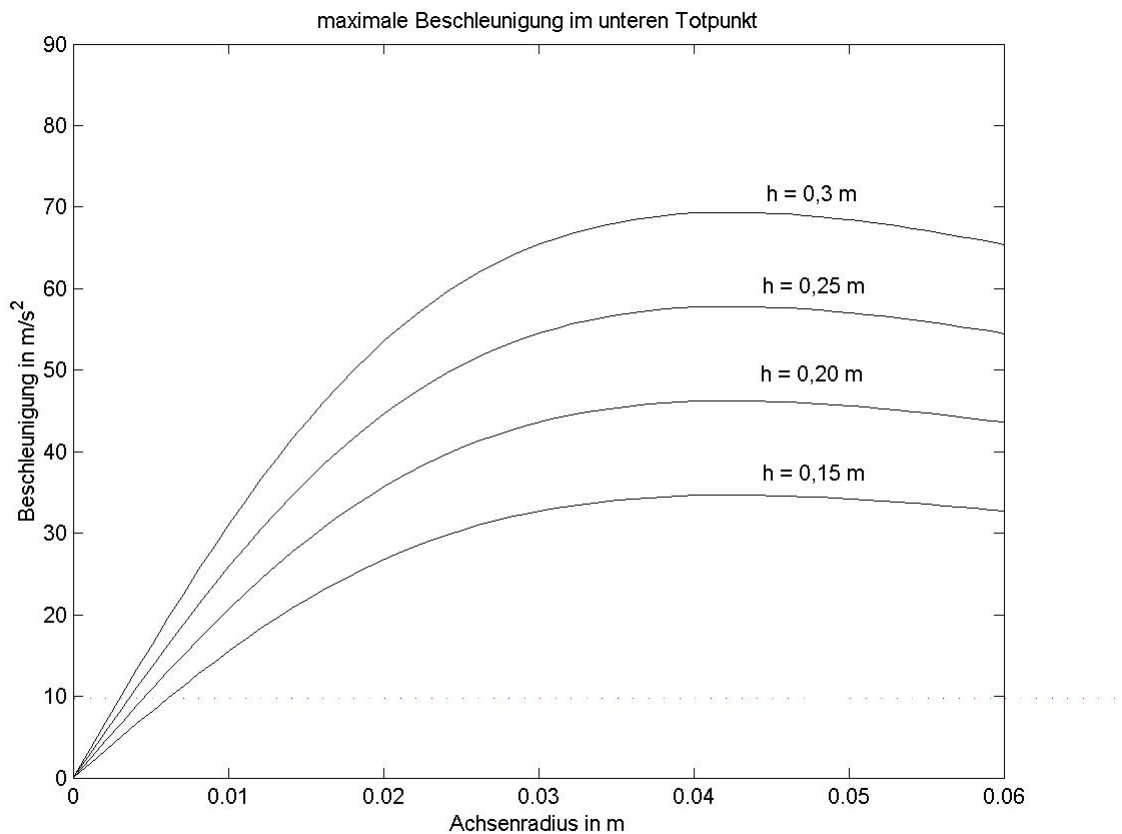


Abb. 2: Maximale Beschleunigung des Jojos in UT in Abhängigkeit von Achsdurchmesser r und Fallhöhe h

Man erkennt, dass die Funktion bei Null beginnt dann ansteigt und schließlich ein Maximum erreicht. Das Maximum liegt bei ca. 0,04 m. Die genaue Koordinate des Maximums ließe sich durch Ableitung von a_{\max} nach r und anschließendem Nullsetzen des Terms bestimmen, dies hat jedoch in unseren Fall keine Relevanz, da ein so großer Achsdurchmesser konstruktiv nicht in Frage kommt.

In Abb. 3 ist dargestellt, wie graphisch aus dem Schnittpunkt der Kurven mit der Geraden $a = g$ der maximal zulässige Achsradius r_{\max} für verschiedene h bestimmt wird.

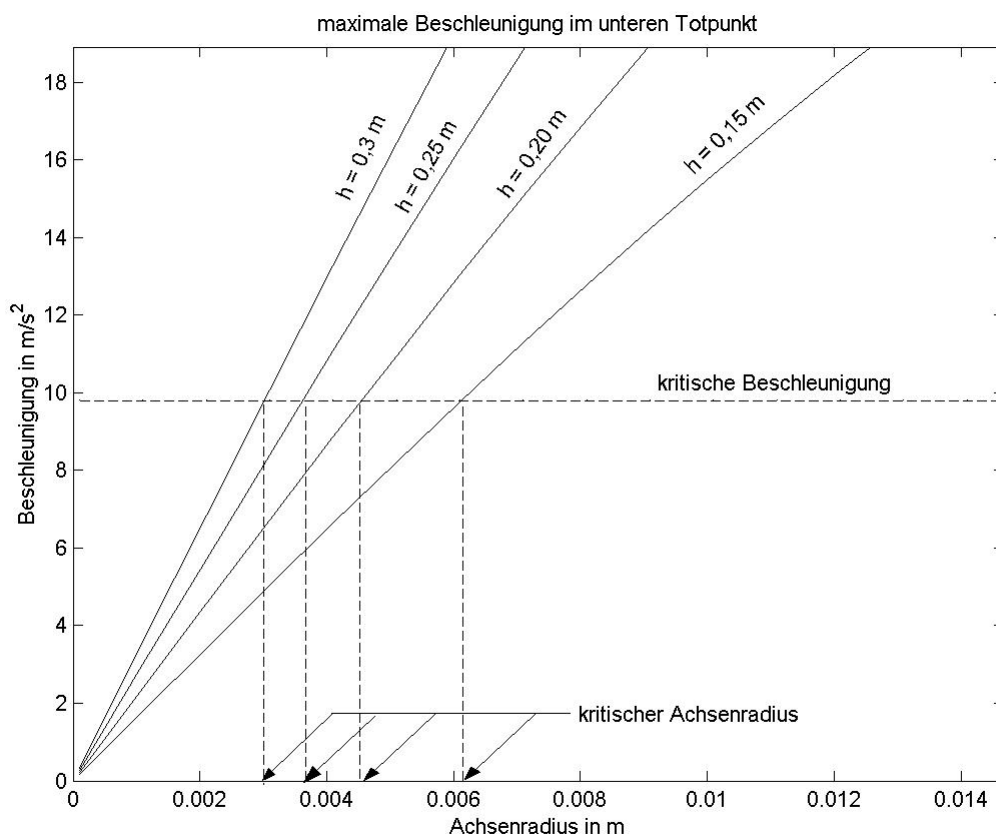


Abb. 3: Ausschnittsvergrößerung von Abb. 2, graphische Ermittlung des kritischen Achsenradius

Es zeigte sich, dass bei den konstruktiven Gegebenheiten des vorhandenen Jojos eine Fallhöhe von 25 cm nicht überschritten werden sollte, um das Seil zu schonen.

1.5 Energiezufuhr

Um Reibungsverluste beim Betrieb auszugleichen muss dem Jojo ständig Energie zugeführt werden. Nur wenn die zugeführte Energie der Verlustenergie entspricht ist ein stabiler Betriebspunkt erreicht. Aus Erfahrung mit Spielzeugjojoes weiß man, dass sich dies über ein Anheben des Seils während das Jojo UT durchläuft bewerkstelligen lässt. Jedoch ist die mechanische Modellierung der Energiezufuhr nicht trivial. Es wird versucht einen möglichst einfachen Ansatz zur Berechnung der Energiezufuhr zu geben.

1.5.1 Einfacher Ansatz

Es besteht beim Jojo in UT eine Analogie zum elastischen Stoß zweier Massen, bei dem die Masse des einen Körpers die des anderen stark überwiegt. Bei diesen Verhältnissen erfährt die

kleine Masse eine starke Beschleunigung, während sich die große Masse praktisch ungestört weiterbewegt.

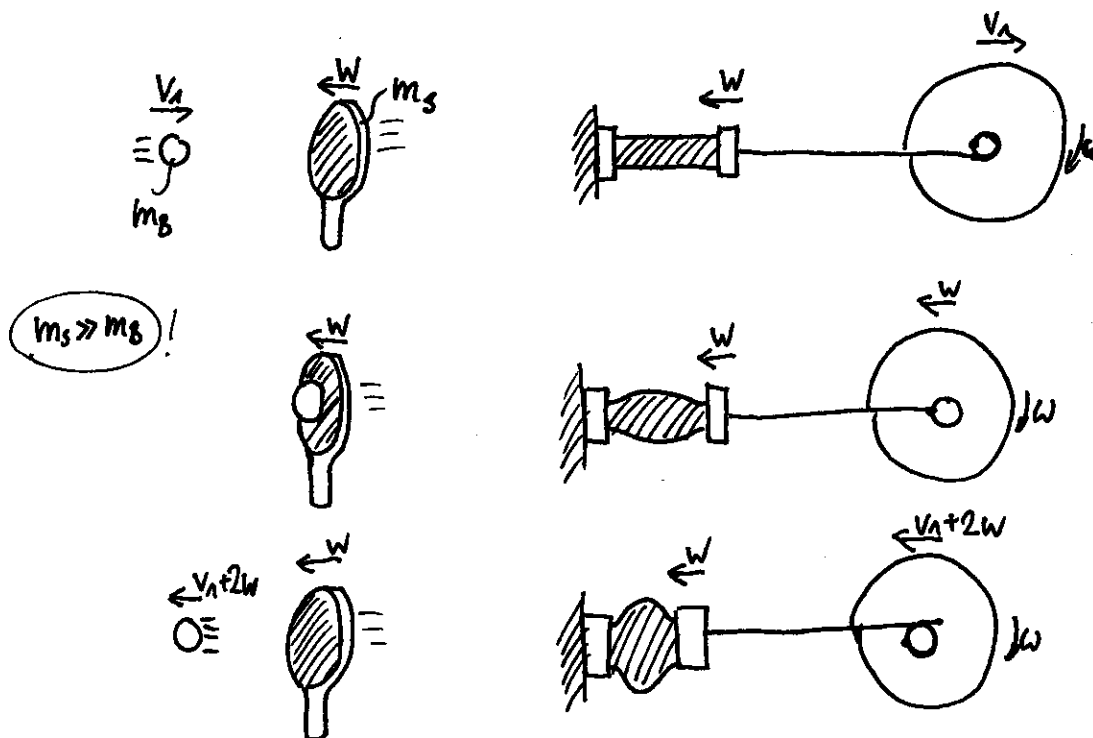


Abb. 4: Verdeutlichung der Analogie zwischen der Energiezufuhr beim Tischtennis durch den Schläger (links) und beim Jojo durch die Kontraktion des Muskels (rechts)

Am Beispiel eines Tischtennisballs lässt sich die Ähnlichkeit deutlich machen. Dem Pingpongball wird kinetische Energie durch den elastischen Stoß mit dem bewegten Schläger zugeführt. Beim Ausführen des Schlags ist kaum ein Rückstoß beim Aufprall zu spüren (im Gegensatz zum Tennis oder Volleyball). Geht man davon aus, dass die Masse des Balls m_B gegenüber der Masse des Schlägers m_S vernachlässigbar ist, addiert sich, nach den Gesetzen des zentralen elastischen Stoß, zum Betrag der Geschwindigkeit des Balls vor dem Stoß v_1 die doppelte Geschwindigkeit des Schlägers w hinzu [1].

Für das Jojo wird angenommen, dass vor und nach UT gilt $\omega = const.$ Dann wird der Aufwärtsgeschwindigkeit nach UT folglich die doppelte Geschwindigkeit des Seils hinzuaddiert. Die zusätzliche Energie lässt das Jojo höher steigen. In Abb. 4 wird die Analogie noch einmal grafisch verdeutlicht.

1.5.2 Berechnung der Zugeführten Energie

Die gewonnene Energie lässt sich über die Differenz der kinetischen Energie vor und nach UT berechnen. Die kinetische Energie vor UT beträgt:

$$E_{kin.1} = \frac{m}{2} v_1^2 \quad (1.21)$$

Die kinetische Energie nach UT:

$$E_{kin.2} = \frac{m}{2} (v_1 + 2w)^2 \quad (1.22)$$

Damit ist der Energiegewinn:

$$E_{gewinn} = \frac{m}{2} (v_1 + 2w)^2 - \frac{m}{2} v_1^2 = \frac{m}{2} (4v_1 + 4w^2) \quad (1.23)$$

1.6 Gestaltungsempfehlungen

Es gibt zwei Ziele, die bei der Auslegung des Jojos verfolgt werden müssen, dies ist zum einen die Minimierung der Reibungsverluste und zum anderen die Realisierung einer sanften Bewegung in UT.

Aus den Voruntersuchungen lässt sich zusammenfassend folgendes zur Gestaltung des Jojos ableiten:

- Will man eine sanfte Bewegung in UT realisieren, muss man J möglichst groß und r möglichst klein vorsehen, wie aus Abb. 2 hervorgeht.
- Es sollte die aus Abb. 3 entnehmbare kritische Fallhöhe nicht überschritten werden.
- Durch Verringerung von r erhöhen sich nach (1.7) allerdings ω und T (proportional v^{-1}), was steigende Reibungsverluste zur Folge hat, die durch eine höhere Energiezufuhr in UT ausgeglichen werden müssen. Es sollte r deshalb nicht „zu klein“ gewählt werden.
- Durch Verringerung von R verringern sich die Reibungsverluste, da die Umfangsgeschwindigkeit sinkt.
- Eine hohe Masse des Jojos hat einerseits den positiven Effekt, dass sich die potentielle Energie bei festem h erhöht, andererseits wird das Seil stärker belastet.

Das vorhandene Maxwellrad ist nach den Ergebnissen der Vorüberlegungen nicht optimal ausgelegt. Die Masse ist zu hoch, wodurch die Seile auf die Dauer zu stark belastet werden, und der relativ hohe Wert von J hat zur Folge, dass T ziemlich lang wird. Da sich das Maxwellrad bereits im Einsatz bewährt hat, wird es Trotzdem zum Aufbau des Jojos verwendet.

2 Anforderungskatalog

Aus der Aufgabenstellung wird zunächst ein möglichst allgemein gehaltenes Problem formuliert, das von vornherein keine Lösungsmöglichkeiten ausschließt. Aus diesem Problem werden dann Forderungen und Wünsche abgeleitet, die zu einem Anforderungskatalog zusammengefasst werden. Die Anforderungen werden dabei möglichst genau quantifiziert, falls Zahlenwerte bekannt sind (z. B. benötigte Leistung, Geschwindigkeit etc.).

2.1 Problemstellung

Das Jojo soll in die Lage versetzt werden, autonom von einem passiven Zustand (unbewegt an den Fäden hängend) wieder in den aktiven Zustand (frei am Seil auf- und abbewegend) zu gelangen.

2.2 Anforderungen

1. Es soll eine Fallhöhe h von 250 mm erreicht werden.
2. Das Prinzip soll zuverlässig funktionieren und mindestens 1000 Zyklen durchhalten.
3. Der Aufbau soll möglichst einfach sein.
4. Der Aufbau soll keine Wartung benötigen.
5. Teile müssen einfach ersetzbar sein.
6. Die äußeren Abmessungen sollen möglichst klein sein.
7. Die Abmessung des vorhandenen Jojos soll unverändert bleiben.
8. Folgende Elemente sollen außerdem weiterverwendet werden:
 - Muskel
 - Ventil
 - Ultraschallsensor zur Abstandsmessung

3 Konzeption

Bei der Konzeption sollen in der ersten Phase möglichst viele unterschiedliche Lösungsansätze für das zu lösende Problem gefunden werden, dabei darf der Kreativität freien Lauf gelassen werden. In der zweiten Phase wird dann entschieden welche der Ansätze weiterverfolgt werden. Zur Entscheidungsfindung stehen unterschiedliche Werkzeuge zur Verfügung [4], in diesem Fall wird eine sog. Entscheidungsmatrix verwendet. Schließlich wird das favorisierte Konzept soweit ausgearbeitet, dass in die Konstruktionsphase eingetreten werden kann.

3.1 Grundkonzepte

Das vorliegende konstruktive Problem ist im Grunde nicht besonders komplex – ein Jojo soll automatisch aufgewickelt werden. Diese Tatsache macht es allerdings möglich in kurzer Zeit eine große Anzahl von Lösungskonzepten zu generieren, die auf allen nur erdenklichen physikalischen Prinzipien basieren. Einige Konzepte sind unten skizziert (siehe Abb. 5 - 7).

Alle diese Konzepte haben sicher ihre Reize, jedoch besteht keine Notwendigkeit, alle diese Konzepte auf ihre Realisierbarkeit zu überprüfen. Wenn eine einfache mechanische Lösung realisierbar erscheint, sollte diese in jedem Fall favorisiert werden.

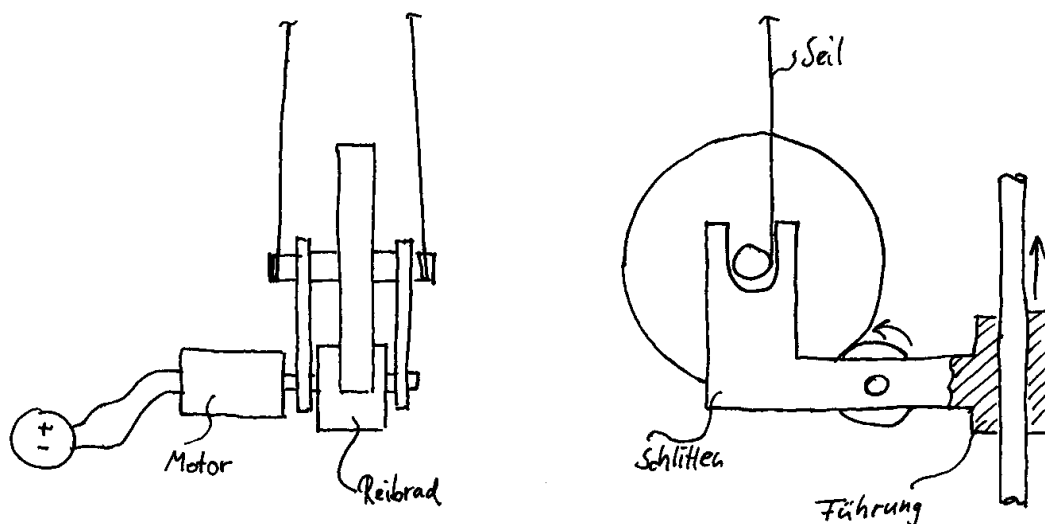


Abb. 5: Reibrad Grundkonzept

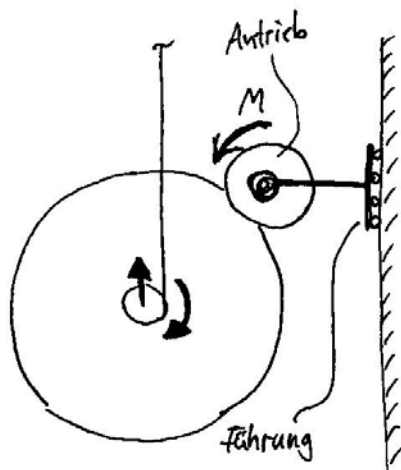


Abb. 6: Mechanisches Grundkonzept mit passivem Heben des Antriebs durch die Aufwärtsbewegung des Jojos

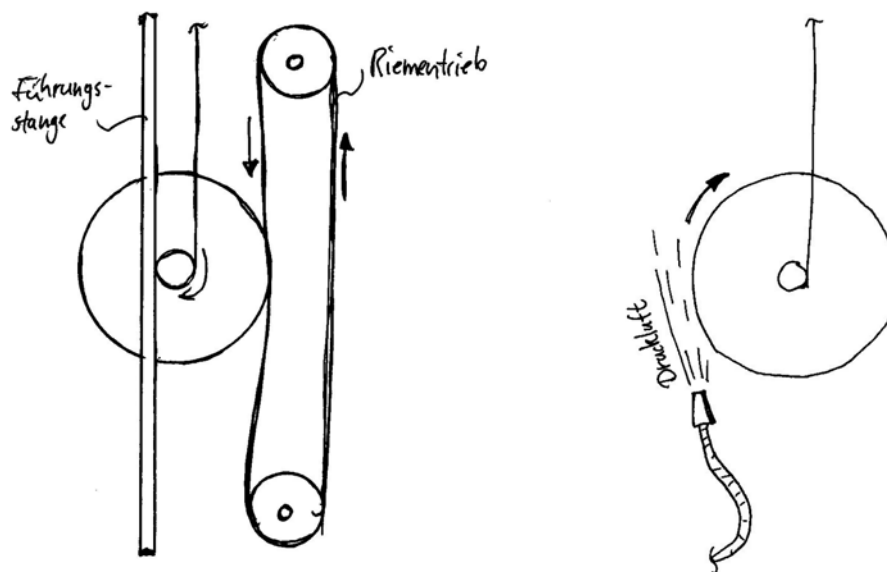


Abb. 7: Weitere Grundkonzepte mit Riementrieb oder Druckluft

3.1.1 Vorauswahl

Das Reibradkonzept (siehe Abb. 5 und Abb. 6) ist mit einfachen Mitteln zu realisieren und basiert auf berechenbaren und reproduzierbaren Prinzipien. Es erhält somit den Vorrang vor allen anderen exotischeren Ideen.

Das Jojo wird an der Achse im Schlitten gelagert, der mit der Führung nach oben bewegt wird. Dabei wird am Umfang des Jojos ein Moment über ein schnell rotierendes Reibrad aufgebracht, wodurch das Seil gestrafft wird.

Drei denkbare Konfigurationen werden im Folgenden diskutiert.

1: zwei Antriebe, aktives Heben

Der Schlitten wird durch Antrieb 1 langsam gehoben, gleichzeitig wickelt Antrieb 2 das Jojo auf.

Nachteile: Es müssen zwei Antriebe ausgelegt werden.

2: ein Antrieb, aktives Heben

Der Antrieb sorgt über ein Getriebe für langsames Heben des Schlittens, und für das Aufwickeln.

Nachteile: Es muss eine aufwendige Getriebemechanik konstruiert werden.

3: ein Antrieb, passives Heben

Der Antrieb dreht das Jojo, das sich dadurch aufwickelt und den Schlitten mit nach oben hebt.

Nachteile: Funktionserfüllung nicht ohne weiteres vorhersehbar, möglicherweise zu große Kräfte auf die Seile.

3.1.2 Entscheidungsmatrix

Die Entscheidung welches Konzept weiterentwickelt werden soll, wird mit Hilfe einer Entscheidungsmatrix getroffen. Dabei wird geprüft inwieweit die Anforderungen an die Konstruktion mit dem jeweiligen Konzept erfüllt werden können. Ein Konzept dient dabei als Standart (1), mit dem die anderen Konzepte hinsichtlich Anforderungserfüllung verglichen werden. Die Zusammenstellung der verschiedenen Konzepte macht deren spezielle Vor- und Nachteile sichtbar. Die Entscheidungsmatrix dient als Diskussionsgrundlage am Ende der Konzeptphase.

3.1.3 Entscheidung

Es wird *Konzept #1* mit getrennten Antrieben für Heben und Wickeln weiterverfolgt. Dieses Konzept ist klar am einfachsten zu realisieren, weil durch die Trennung der Funktionen die konstruktiven Aufgaben auch getrennt gelöst werden können. Der Nachteil, dass zwei verschiedene Antriebe eingebaut werden müssen wird durch die Vorteile hinsichtlich Modularisierbarkeit und Einfachheit überwogen.

Tab. 1: Entscheidungsmatrix des Linearführungskonzepts

	<i>1: zwei Antriebe, aktives Heben</i>	<i>2: ein Antrieb, aktives Heben</i>	<i>3 ein Antrieb, passives Heben</i>
Funktion	V	=	?
Einfachheit	E	-	--
Preis	R	=	=
Modularisierbarkeit	G	-	-
Wartung	L	=	=
Wertung		-2	-3

3.2 Funktionsprinzip der Aufrollautomatik

In der Auswahl wurde ein Konzept favorisiert, bei dem jeweils ein Antrieb für die Rotation und ein Antrieb für die Aufwärtsbewegung des Jojos genutzt wird. Dadurch lassen sich beide Antriebe getrennt voneinander auslegen.

Rotation des Jojos: Die Achse des Jojos befindet sich in Lagerschalen, wodurch alle Freiheitsgrade bis auf Rotation um die x -Achse und Translation in z -Richtung festgelegt sind. In z -Richtung kommt es auf dem Reibrad zu liegen. Die Rotation des Reibrads überträgt sich unter Schlupf durch Reibung auf das Jojo. Es stellt sich eine konstante Seilkraft ein. Das Jojo rotiert, wenn sich der Schlitten in Aufwärtsbewegung befindet.

Aufwärtsbewegung des Jojos: Das Jojo würde sich allein durch seine Rotation nach oben ziehen, allerdings muss das Reibrad nachgeführt werden. Dies geschieht über eine Linearführung, die den Schlitten langsam nach oben befördert. Die Rotation des Jojos

passt sich der Hebegeschwindigkeit an, die Hebegeschwindigkeit wird wiederum von der Seilkraft beeinflusst.

3.3 Ablaufplan beim Aufwickeln des Jojos

Der Ablauf beim Aufwickeln gliedert sich in die Phasen „Anheben“ und „Zurückfahren“ des Schlittens. Der Ablaufplan bildete die Grundlage für die Konzeption der Steuerung. Darüber hinaus soll die Betrachtung des gesamten Zyklus sicherstellen, dass bei der Konzeption keine Fehler unterlaufen sind.

Anheben

Situation 1: Die Sensoreinheit detektiert, dass sich das Jojo kaum noch bewegt und ein erneutes Aufwickeln von Nöten ist.

Aktion 1: Es werden Antrieb der Linearführung und Gleitradantrieb aktiviert. Dadurch wird der Schlitten angehoben, und die Aufrollautomatik funktioniert nach dem unter 3.2 beschriebenen Prinzip.

Situation 2: Der Schlitten wird durch einen Sensor in der oberen Endlage detektiert.

Aktion 2: Daraufhin werden Linearführungsantrieb und Gleitradantrieb abgeschaltet.

Zurückfahren

Situation 3: Das Jojo befindet sich startbereit in der oberen Position.

Aktion 3: Der Linearführungsantrieb wird mit umgepolter Spannung wieder aktiviert, dadurch fährt der Schlitten nach unten. Der Schlitten muss dabei die Strecke zwischen der oberen und der unteren Endposition schneller zurücklegen als das Jojo!

Situation 4: Der Schlitten wird von einem Endlagensensor in der unteren Endposition detektiert.

Aktion 4: Der Linearführungsantrieb wird abgeschaltet.

Situation 5: Das Jojo ist aktiv und wird vom Muskel in Bewegung gehalten.

3.4 Berechnung der auftretenden Kräfte beim Aufwickeln

3.4.1 Freischnitt

Um Größen der Kräfte und Momente während des Aufrollens zu bestimmen, wird das Jojo frei geschnitten. Es wird angenommen, dass das Jojo mit konstanter Geschwindigkeit rotiert und sich gleichförmig nach oben bewegt. Daraus folgt, dass die Betrachtung rein statisch erfolgen kann (keine Beschleunigungsterme müssen berücksichtigt werden).

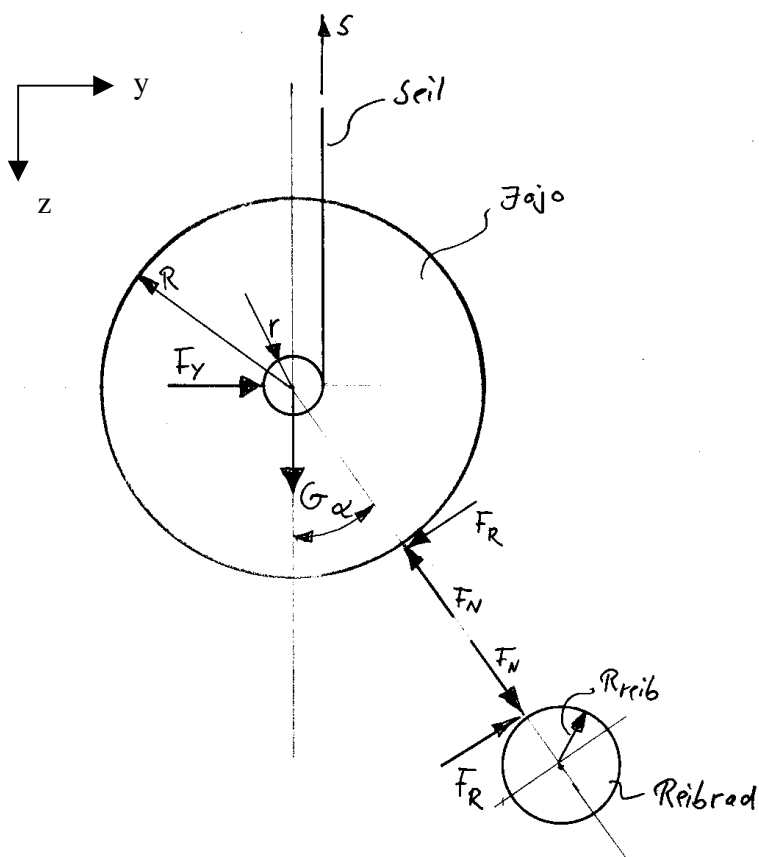


Abb. 8: Freischnitt des Jojos beim Aufrollen

- Mit
- R = Scheibenradius des Jojos
 - r = Achsenradius des Jojos
 - R_{reib} = Radius des Reibrads
 - α = Eingriffswinkel des Reibrads
 - S = Seilkraft
 - F_y = Lagerkraft an der Achse

F_N = Normalkraft

F_R = Reibkraft

μ = Gleitreibungskoeffizient

3.4.2 Aufstellen von Kräfte- und Momentengleichgewicht

Kräftegleichgewicht in y -Richtung:

$$F_y = F_R \cos \alpha + F_N \sin \alpha \quad (3.1)$$

Kräftegleichgewicht in z -Richtung:

$$G = S + F_N \cos \alpha - F_R \sin \alpha \quad (3.2)$$

Momentengleichgewicht um x -Achse:

$$S \cdot r = F_R \cdot R \quad (3.3)$$

Zusatzbedingung:

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (3.4)$$

Durch Umformen der Gleichungen (3.1) – (3.4) ergeben sich folgende Lösungen:

$$S = \mu \cdot \frac{R}{r} \cdot F_N \quad (3.5)$$

$$F_N = \frac{G}{\mu \cdot \frac{R}{r} + \cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha} \quad (3.6)$$

$$F_y = \mu \cdot F_N \cos \alpha + F_N \cdot \sin \alpha \quad (3.7)$$

Untersuchung für variablen Angriffswinkel

Für diese Untersuchung werden für die Variablen G , R und r die Werte des vorhandenen Jojos übernommen. Für Gleitreibungskoeffizienten $\mu = 0,1$; $0,15$ und $0,2$ sind in Abb. 9 die Verläufe der Funktionen (3.5), (3.6) und (3.7) dargestellt.

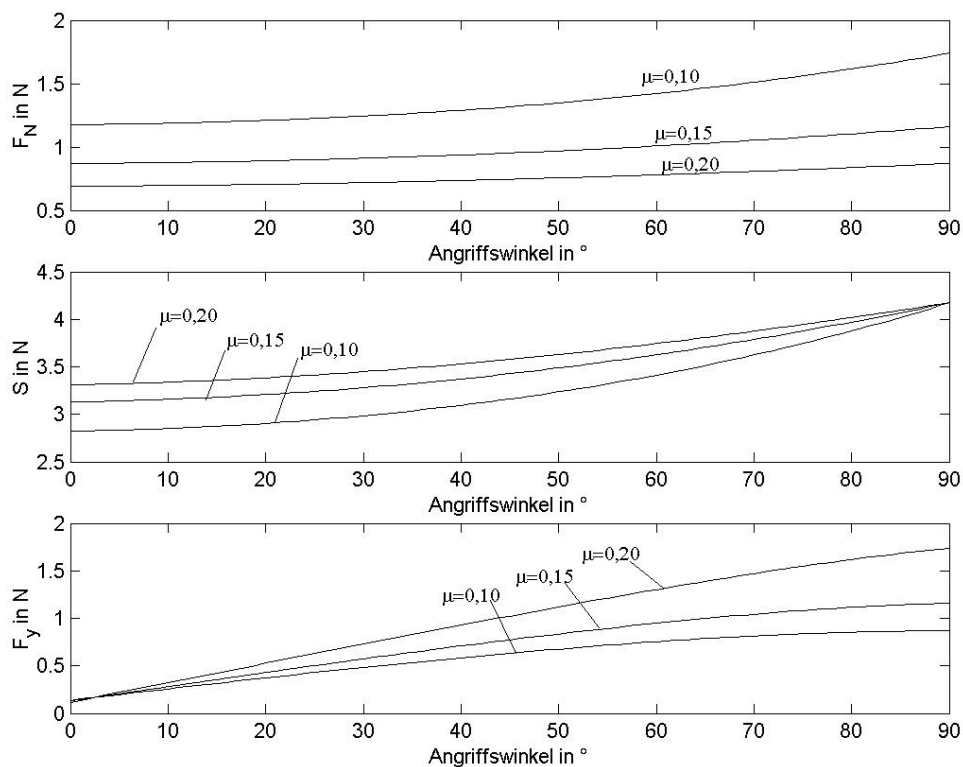


Abb. 9: Verlauf der Normalkraft F_N , der Seilkraft S und der Lagerkraft F_Y bei variablem Angriffswinkel α für verschiedene Gleitreibungskoeffizienten μ .

Benötigtes Antriebsmoment des Wickelmotors

Bei $\mu = 0,15$ bewegt sich F_N in der Größenordnung von 1 N. Nach (3.4) beträgt somit F_R in etwa 0,15 N. Das Antriebsmoment des Wickelmotors M_{reib} ergibt sich aus

$$M_{reib} = F_R \cdot R_{reib} \quad (3.8)$$

Schlussfolgerung

Es zeigt sich, dass weder α noch μ besonders starke Auswirkungen auf die Größen von F_N und S haben. Bei der Wahl von Anordnung und Material des Reibrads herrscht relative Freiheit.

3.5 Konzeption der Steuerung

In Abb. 10 sind alle Elemente, die für die Steuerung des Jojos und der Aufrollautomatik nötig sind dargestellt. Alle Steuerungselemente sind in der Skizze mit dem Steuerungsgerät verbunden.

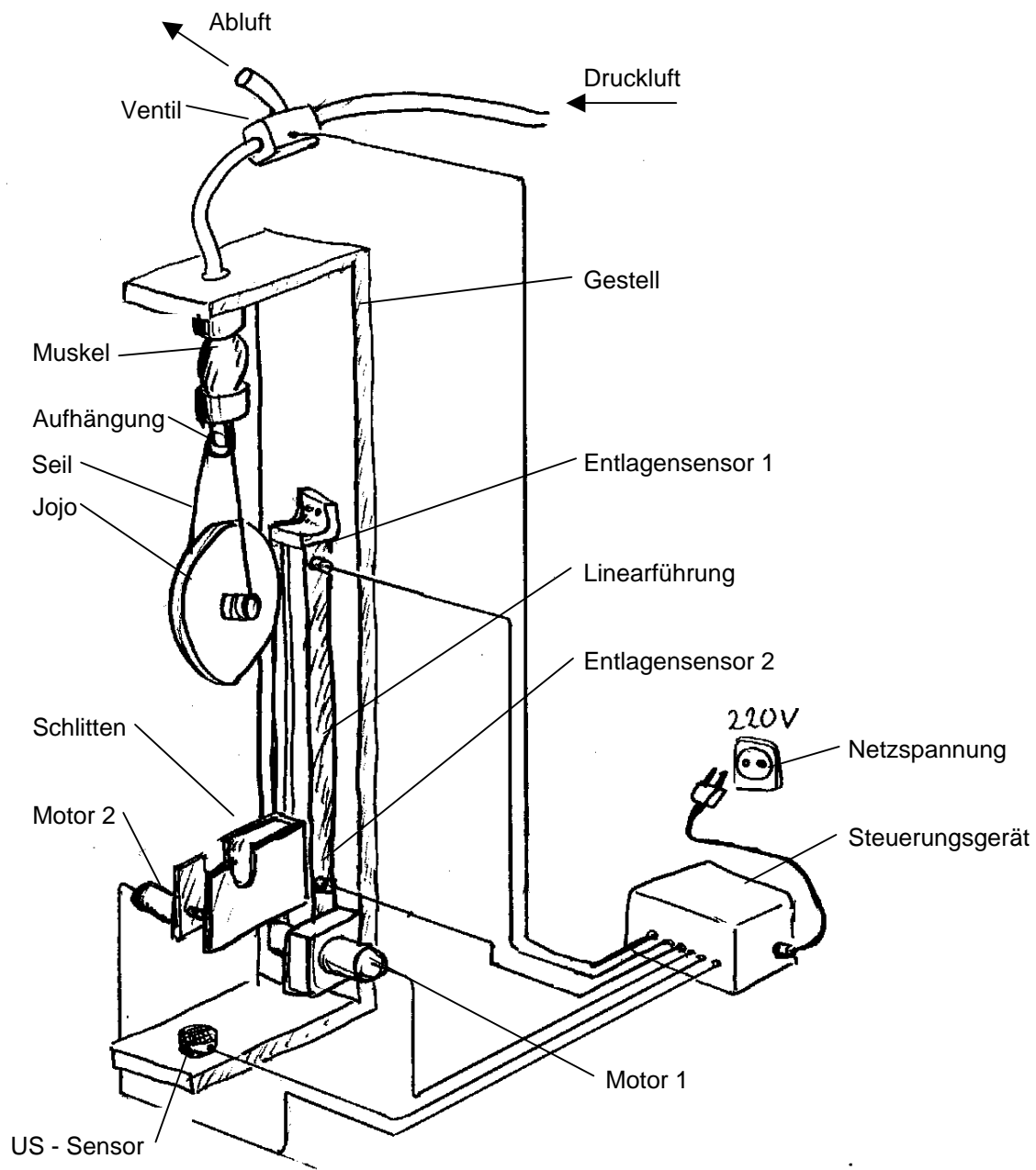


Abb. 10: Skizze des Konzepts mit den wichtigsten Bauteilen

3.5.1 Benötigte Sensoren

Zwei Endlagensensoren: An der Linearführung angebracht geben sie ein digitales Signal, wenn der Schlitten die obere bzw. untere Endposition erreicht hat. Dies kann elektrisch, magnetisch, mechanisch oder optisch geschehen.

Abstandssensor: Beim betrieb des Jojos soll ständig dessen Höhe berührungslos überwacht werden. Der Sensor sollte ein möglichst abstandsproportionales analoges Ausgangssignal liefern. Optische (IR) oder akustische (Ultraschall) Sensoren können verwendet werden.

3.5.2 Aktive Elemente

Wickelmotor: Keine besonderen Anforderungen. Möglichst einfach und leicht. Maximale Betriebsspannung sollte entweder 12 V oder 24 V betragen.

Linearführungsantrieb: Muss gute Qualität haben, sollte vor allem ein konstantes Drehmoment liefern. Nennbetriebsspannung sollte entweder 12 V oder 24 V betragen (Einstellmöglichkeit für Aufwärtsbetrieb ist unbedingt vorzusehen).

Ventil: Einsatz zur Be- und Endlüftung des Muskels. Das bereits eingesetzte Ventil funktionierte zuverlässig und wird deshalb weiterverwendet. Betriebsspannung 24 V.

4 Relais: Um die Betriebsspannungen der aktiven Elemente zu schalten werden entsprechend ausgelegte Schalter benötigt.

1. Wickelmotor ein/aus
2. Linearführungsantrieb ein/aus
3. Spannungsumpolung des Linearführungsantriebs
4. Ventil belüften/entlüften

3.5.3 Spannungsversorgung

Alle Elemente der Steuerung müssen mit Gleichstrom versorgt werden. Dafür ist ein entsprechender Trafo vorzusehen.

Die Motoren für die Bewegung der Linearführung und des Reibrads müssen mit abgestimmten Spannungen versorgt werden, um einen einwandfreien Betrieb zu ermöglichen. Die Spannungen lassen sich nur im Versuch ermitteln, da viele unvorhersehbare Faktoren mit hineinspielen (z.B. Verlustmomente). Die Schaltung muss später diese Spannungen zur Verfügung stellen. Es werden drei verschiedene Spannungen benötigt:

1. Aufwärtsbewegung der Linearführung
2. Abwärtsbewegung der Linearführung

3. Versorgung des Wickelmotors

3.5.4 Steuerungsgerät

Die Steuerung kann entweder von einem programmierbaren Mikrocontroller aus oder einem mit AD/DA Wandlerkarte ausgerüstetem PC erfolgen.

Das Gerät muss über folgende Spezifikationen verfügen, wie aus 3.5.1 und 3.5.2 hervorgeht:

1. Zwei digitale Eingänge für die Entlagersensoren (2xDIN)
2. Ein analoger Eingang für die Höhenerfassung (1xAI)
3. Vier digitale Ausgänge für die Schaltung der Relais (4xDOUT)

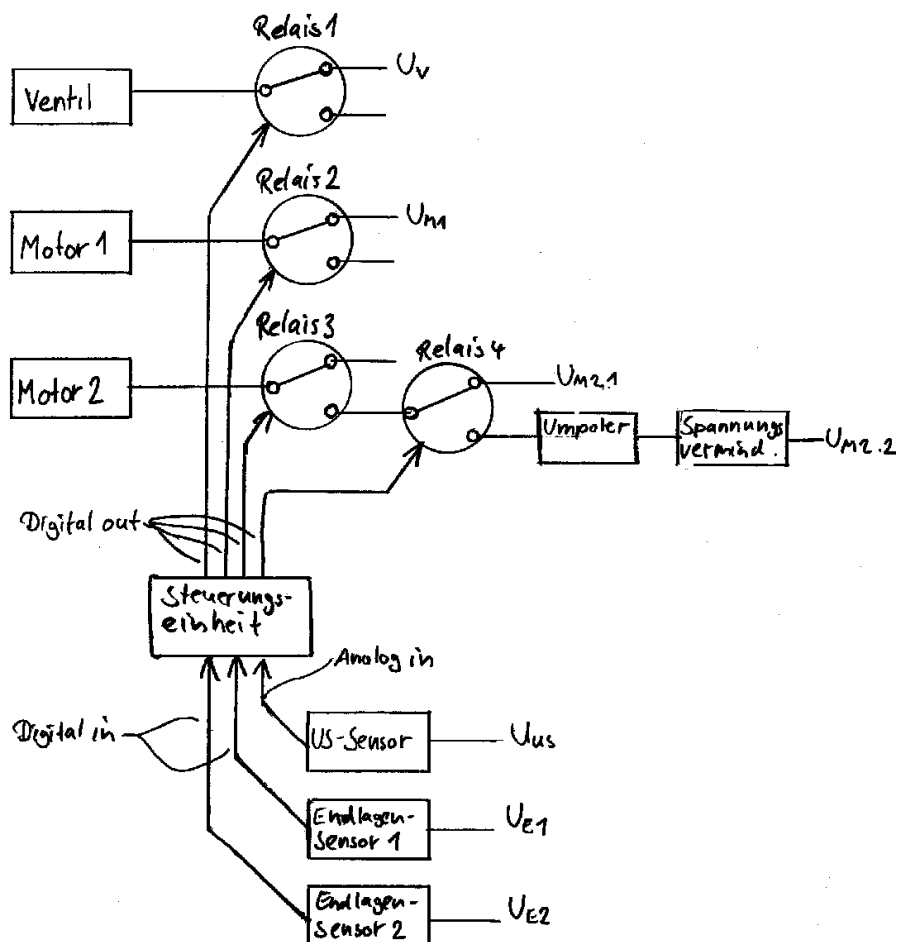


Abb. 11: Konzept der Steuerungselektronik

4 Auslegung der Module

Nach erfolgter Konzeption und Identifizierung der benötigten Module erfolgen nun Auslegung und Auswahl der einzelnen Komponenten. Zuvor müssen bei einigen Komponenten noch die zu erfüllenden Anforderungen quantifiziert werden. Außerdem werden mögliche Probleme beim Einsatz der Komponenten diskutiert.

4.1 Übernommene Bauteile

Im Einsatz bewährte Elemente des Jojos werden einfach übernommen und in das neue Gerät integriert. Trotzdem treten bei einigen Elementen Probleme auf die bei einer Weiterentwicklung noch behoben werden sollten. Auf diese Probleme wird hingewiesen, und es werden Verbesserungsvorschläge gemacht. Die Übernommenen Komponenten wurden bereits eingehend in [3] beschrieben.

4.1.1 Maxwellrad

Durchmesser	$R = 61 \text{ mm}$
Achsradiusmesser	$r = 2,5 \text{ mm}$
Masse	$m = 0,4 \text{ kg}$
Massenträgheitsmoment	$J = 0,00072 \text{ kg m}^2$
Fallhöhe (ohne Überspringen) h	$h = 0,20 \text{ m}$

Das Maxwellrad ist in der Fertigung teuer (siehe Kapitel 5), ein kleineres Maxwellrad aus Plastik (z.B. Acrylglas) mit einer dickeren Achse könnte billiger im Eigenbau hergestellt werden, und würde durch sein geringeres Gewicht das Seil weniger beanspruchen. Eine kleinere Bauweise würde auch zu einer schnelleren Auf- und Abbewegung führen, was die Vorführung der Apparatur möglicherweise interessanter machen würde.

4.1.2 Muskel

Der Muskel ist ein im Einsatz bewährtes Bauteil, das keiner weiteren Veränderung bedarf.

Typ: MAS-10-N80-AA-MCFK, Hersteller FESTO

4.1.3 Ventil

Das Ventil ist ebenfalls ein Bauteil, das sich im Einsatz bewährt hat, und somit keiner Veränderung bedarf.

Typ: MSZE-3-24 DC, Hersteller FESTO

4.1.4 Abstandssensor

Typ: Wegener Sensortechnik, Serie 301 V

Mögliche Probleme

Der Sensor reagiert empfindlich auf Objekte die in die Keule der Schallausbreitung hineinragen. Versuche zeigten, dass besonders „Überhänge“ störende Auswirkung haben. Objekte mit Flächen parallel zur Richtung des Sensors müssen einen radialen Abstand von ca. 30 mm zum Zentrum des Sensors haben

Das Problem ist den Sensor so anzubringen, dass der Schlitten, der sich genau zwischen Rad und Sensor befindet, das Signal nicht stört und gleichzeitig die Position des Rades einwandfrei detektiert werden kann.

Zur Vermeidung von Störungen des Signals wird zum einen der Sensor möglichst weit entfernt vom Schlitten angeordnet, zum anderen wird die dem Sensor zugewandte Seite des Schlittens glatt und senkrecht ausgeführt, um störende Schallreflexionen zu vermeiden.

VORSICHT BEIM ANSCHLIESSEN: Der Sensor besitzt keinerlei Schutzsicherung gegen Verpolung! Es ist peinlich genau darauf zu achten die Betriebsspannung nicht an den Signalausgang oder die Masseleitung zu legen!!!

Lösung

Der Sensor befindet sich nicht direkt unter dem Rad, sondern strahlt mehr tangential auf die Kante des Jojos. Der Schlitten befindet sich weit genug von der Schallkeule entfernt, um einen einwandfreien Betrieb nicht zu stören.

Man könnte den Sensor auch über dem Rad installieren, er könnte dann weiter in Richtung Mitte platziert werden.

4.1.5 Seil

Das verwendete Seil besteht aus einem sehr dünnen Dynema-Faden. Dynema weist eine hohe Festigkeit und eine sehr hohe Längssteifigkeit auf. Solche Seile werden als Drachenleine verwendet, sie können im Modellbaugeschäft erworben werden.

4.1.6 Führungsseil

Das Führungsseil besteht ebenfalls aus Dynema, hat allerdings einem größeren Durchmesser.

4.1.7 Einspannung

Um das Seil am Muskel zu befestigen, muss ein entsprechendes Bauteil gefertigt werden. Dieses besteht in unserem Fall aus einer Rolle, die mit einem Gewindebolzen verbunden ist, der in den Muskel eingeschraubt wird. Das Seil wird über die Rolle geführt und mit einem Stück Klebestreifen fixiert.

Die Einspannung könnte sicher noch etwas eleganter gestaltet werden.

4.2 Die Linearführung

Zur Bewegung des Schlittens muss eine geeignete Führung ausgewählt werden. Der Hub der Führung sollte ein gutes Stück länger als die Fallhöhe des Maxwellrads sein, um genügend Raum für das Zurückfahren des Schlittens zu lassen.

Die Baureihe DGE der Firma FESTO® enthält Führungen in allen möglichen Stärken und Längen. Darüber hinaus verfügt es über integrierbare Endlagensensoren, Endlagendämpfer und Anschlusssteile sowie über ein ansprechendes Design. Der Schlitten wird über einen Zahnriementrieb angetrieben.

4.2.1 Abschätzung der Belastungen

Die Führung muss zum einen die Gewichtskraft des Schlittens samt Jojo, zum anderen das durch den Hebelarm des Kraftangriffspunktes entstehende Moment aufnehmen.

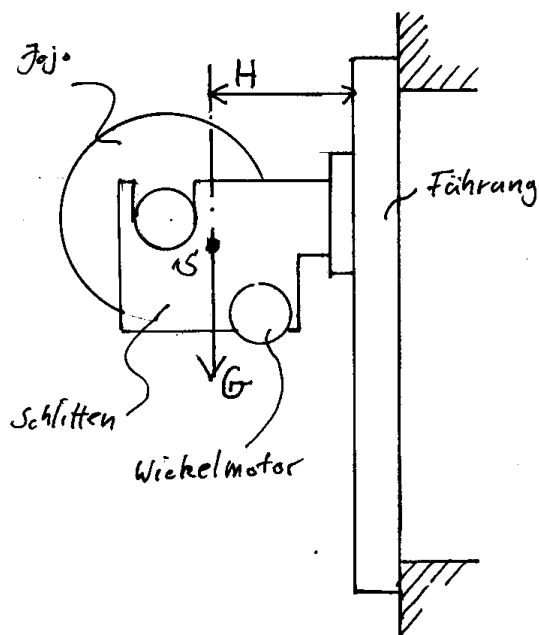


Abb. 12: Kräfte und Momente auf die Linearführung

Die vereinigte Masse von Schlitten, Jojo und Wickelantrieb wird 1,5 kg nicht überschreiten. Der Hebelarm H des Massenmittelpunktes wird im Bereich von R liegen. Daraus resultieren folgende Belastungen:

Kraft in z-Richtung	$G_{ges} = 15 \text{ N}$
Moment um y-Achse	$M_y = G_{ges} R = 0,9 \text{ N m}$

4.2.2 Auswahl

Das Modell DGE-8-300-ZR befriedigt alle Voraussetzungen bezüglich der zu erwartenden Belastungen bei kompakter Bauweise.

Hub	$h_{führung} = 400 \text{ mm}$
Radius der Zahnräder des Riementriebs	$r_{riemen} = 5 \text{ mm}$ (gemessen)
Masse der Führung	$m_{führung} = 0,5 \text{ kg}$ (grob geschätzt)
Verlustmoment	$M_{verlust} = 10 \text{ mN m}$ (grob geschätzt)

4.3 Der Wickelantrieb

Um das Maxwellrad beim Aufwickeln zu drehen, werden nur sehr kleine Kräfte und Leistungen benötigt, allerdings sollte der Antrieb eine hohe Drehzahl (ca. 100 s^{-1}) erreichen, um die Baugröße des Reibrads klein halten zu können. Idealerweise wird die Abtriebswelle direkt als Reibrad verwendet, wodurch die Fertigung eines Extrabauteils entfällt.

Die Bestimmung der Kräfte auf das Reibrad erfolgt unter Zuhilfenahme von Abb. 9, das benötigte Drehmoment ergibt sich dann aus (3.8).

Mit $\alpha = 10^\circ$ („Vernünftiger“ Anstellwinkel)

$\mu = 0,15$ („Vernünftiger“ Reibkoeffizient)

ergibt sich

$$F_N = 0,8 \text{ N}$$

$$F_R = 0,12 \text{ N}$$

Auswahl: Dem verwendeten billigen Modell fehlt eine Typenbeschreibung. Die Betriebsspannung beträgt 12 V und es verfügt über eine Lehlaufdrehzahl von $> 10.000 \text{ min}^{-1}$.

Abtriebsmoment $M_{reib} > 0,5 \text{ mN m}$

Motordrehzahl $n_{reib} > 100 \text{ s}^{-1}$

Abtriebswellenradius $R_{reib} = 1 \text{ mm}$

Mit dem verwendeten Motor ergibt sich ein nötiges Drehmoment von:

$$M_{reib} = F_R R_{reib} = 0,12 \text{ mN m.}$$

Der Wickelmotor muss also bei einem Lastmoment von 0,12 mN m eine Drehzahl von 100 s^{-1} liefern.

4.4 Der Antrieb der Linearführung

Der Antrieb, bestehend aus einer passenden Motor-Getriebe-Paarung, muss für zwei sehr unterschiedliche Betriebspunkte ausgelegt werden. Beim Aufrollen muss der Motor sich langsam mit relativ hohem Lastmoment bewegen, beim Zurückfahren liegt ein geringes Moment an, aber es muss eine relativ hohe Geschwindigkeit erreicht werden.

4.4.1 Aufrollen des Rades

Der Motor muss den Schlitten, das darin befindliche Jojo und den Wickelantrieb langsam und möglichst gleichmäßig über die Linearführung nach oben befördern. Die Geschwindigkeit der

Aufwärtsbewegung wird durch die Umfangsgeschwindigkeit des Wickelantriebs und die daraus resultierende maximal mögliche Aufrollgeschwindigkeit des Jojos limitiert. Gesucht ist die maximal mögliche Drehzahl des Motors $n_{an.max}$.

Die Umfangsgeschwindigkeit des Reibrads beträgt

$$\begin{aligned} v_{reib} &= 2\pi \cdot n_{reib} R_{reib} \\ &= 630 \text{ mm s}^{-1} \end{aligned} \quad (4.0)$$

$$\begin{aligned} v_{auf.max} &= v_{reib} \frac{r}{R} \\ &= 25 \text{ mm s}^{-1} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Die maximale Drehzahl des Motors ergibt sich aus dem Durchmesser des Zahnriementriebs der Linearführung.

$$\begin{aligned} n_{an.max} &= \frac{v_{auf.max}}{2\pi r_{riemen}} \\ &= 0,7 \text{ s}^{-1} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Das benötigte Antriebsmoment M_{auf} ergibt sich aus dem Gewicht von Schlitten und Jojo G sowie dem Verlustmoment der Linearführung.

$$\begin{aligned} M_{auf} &= r_{führung} G + M_{Verlust} \\ &= 54,1 \text{ mN m} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Betriebspunkt „Aufrollen“:

$$\begin{aligned} M_{auf} &= 54,1 \text{ N m} \\ n_{an.max} &< 0,7 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

4.4.2 Zurückfahren des Schlittens

Wenn das Jojo die Startposition erreicht hat, muss der Motor den Schlitten möglichst schnell wieder in die untere Position zurückfahren. Die Fallhöhe h muss dabei schneller zurückgelegt werden als das Jojo zum Abrollen braucht. Gesucht ist die minimal benötigte Drehzahl $n_{ab.min}$.

Die Falldauer T des Jojos in Abhängigkeit von der Fallhöhe beträgt [1]:

$$T = \sqrt{\frac{h}{2a}}, \quad \text{mit } a = 1 + \frac{J}{m_{\text{Jojo}} r^2}. \quad (4.4)$$

$$= 1,5 \text{ s}$$

Bei einer Fallhöhe von 0,2 m bleiben also 1,5 s Zeit. Dies entspricht einer durchschnittlichen Mindestgeschwindigkeit $v_{ab.min}$ von $0,13 \text{ m s}^{-1}$. Dies entspricht einer Drehzahl von

$$n_{ab.min} = \frac{v_{ab.min}}{2\pi r_{\text{riemen}}}, \quad \text{mit } v_{ab.min} = \frac{h}{T} \quad (4.5)$$

$$= 4,13 \text{ s}^{-1}$$

Das benötigte Antriebsmoment M_{ab} lässt in diesem Fall schwer bestimmen, da die Reibung in der Führung mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigt. Tests zeigten jedoch, dass M_{ab} vernachlässigbar ist.

Betriebspunkt „Zurückfahren“:

$$M_{ab} \approx 0 \text{ N m}$$

$$n_{ab} > 4,13 \text{ s}^{-1}$$

4.4.3 Auswahl eines passenden Antriebs

Die beiden Betriebspunkte „Aufwickeln“ und „Zurückfahren“ müssen im Kennfeld der gewählten Motor-Getriebekombination liegen. Als Spannungsversorgung stehen 24 V zur Verfügung, die für den Betrieb des Ventils nötig sind, und es kann für den Motor eine weitere Spannungsquelle eingesetzt werden. Eine Faustformel besagt, dass höchstens 1/3 der Trafospannung über einen Spannungsteiler abgeführt werden soll.

Auswahl 1. Versuch

Um das Prinzip der Aufrollautomatik testen zu können wurde ein billiger Conrad Getriebemotor gewählt. Die Leistung des Motors war deutlich überdimensioniert. Das Planetengetriebe konnte stufenweise aufgebaut werden. Der Motor schafft es mit zwei Getriebestufen den Schlitten samt Jojo zu heben und auch in genügend kurzer Zeit in die Ausgangsposition zurückzufahren.

Allerdings ergaben sich dabei mehrere Unzulänglichkeiten des Antriebs. Beim Aufwickeln ließ sich der Betriebspunkt nicht gut einstellen, die Geschwindigkeit des Antriebs variierte stark und konnte somit für einen autonomen Betrieb ohne Drehzahlregelung nicht verwendet

werden. Durch die mindere Qualität des Getriebes war keine lange Lebensdauer zu erwarten und außerdem verursachte es eine unangenehme Geräuschemission.

Auswahl 2. Versuch

Aufgrund der Erfahrungen mit dem Conradmotor wurde ein höherwertiger Motor der Firma Maxon ausgewählt. Dieser sollte für diese Anwendung eine in jedem Fall ausreichende Qualität haben, und vor allem bei konstanter Spannung ein konstantes Drehmoment liefern. Außerdem sind ausführliche Datenblätter zu den Motoren vorhanden, und Maxon bietet telefonisch Unterstützung bei der Auslegung der Motoren an.

Zur Auslegung wird außerdem im Katalog ein Programm mitgeliefert, das aufgrund der Betriebsbedingungen, Vorschläge für mögliche Motor- Getriebekombinationen macht. Für eine gewählte Kombination lassen sich Kennlinien generieren.

- **Ideale Drehzahlkennlinie:** Diese Kennlinie beschreibt das idealisierte Verhalten des Motors bei konstanter Spannung U . Mit steigendem Drehmoment nimmt die Drehzahl linear ab. Leerlaufdrehzahl n_0 und Anhaltmoment M_H verändern sich proportional zur angelegten Spannung U (Parallelverschiebung der Kennlinien)
- **Reale Drehzahlkennlinie:** Diese Kennlinie berücksichtigt die Einflüsse von spannungs- und drehzahlabhängigen Verlusten in Motor und Getriebe. Die Linearität geht daher verloren. In Abb. 13 und Abb. 14 sind die realen Kennlinien des gewählten Antriebs für 24 V und 9 V dargestellt.
- **Stromkennlinie:** Diese Kennlinie stellt die Äquivalenz von Strom und Drehmoment dar. Es ist für die Auslegung wichtig, wie viel Strom der Antrieb beim Betrieb zieht.

Nach iterativen Versuchen mit dem Auswahlprogramm und Rücksprache mit Maxon wurde eine mögliche Motor- Getriebekombination gewählt, die in beiden Betriebspunkten die Anforderung erfüllt.

- **Motor:** A-max 22, CLL, 3.5 W, Nennspannung 24 V
(Bestellnummer 110140)
- **Getriebe:** Planetengetriebe 22, leichte Ausführung, Untersetzung 19:1
(Bestellnummer 110355)

Es wird bei 24 V wird eine ausreichend hohe Drehzahl für das Zurückfahren erreicht, bei 9 V wird das Aufrollmoment mit genügend geringer Drehzahl dargestellt und der Ankerstrom bleibt in beiden Fällen in erträglichen Grenzen.

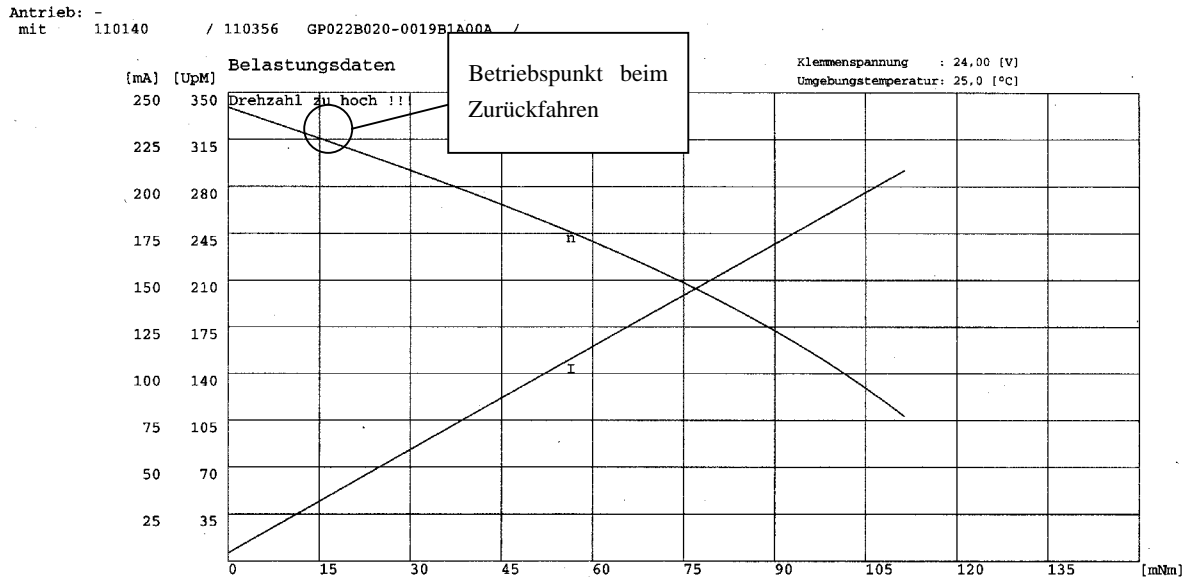


Abb. 13: Reale Drehzahlkennlinie des gewählten Antriebs bei 24 V Betriebsspannung

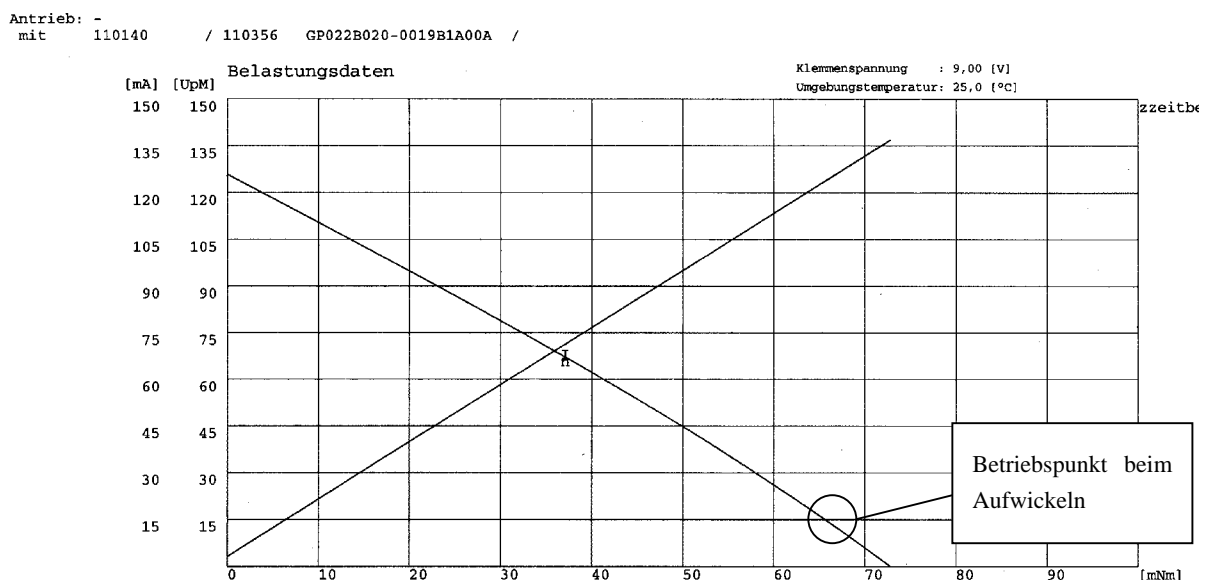


Abb. 14: Reale Drehzahlkennlinie des gewählten Antriebs bei 9 V Betriebsspannung

4.5 Das Gestell

Am Gestell sollen alle Elemente der Anlage sicher befestigt werden. Die Konstruktion

Anforderungen

- Ausreichende Steifigkeit – kein Verbiegen oder Schwingen bei ziehendem Muskel
- Sicherstellen ausreichender Standfestigkeit der Konstruktion
- Leichte Konstruktion
- Einfache Herstellung
- Variable Einstellung möglich

4.5.1 Beschreibung der ausgeführten Konstruktion

Profilsystem

Das Gestell besteht aus Profilsystemteilen der Firma ITEM. Diese Aluminiumprofile haben den Vorteil, dass sich belastbare Strukturen quasi aus dem Baukasten erstellen lassen. Die Basis dafür stellt ein Vierkantprofil mit durchgehenden Nutenschienen auf allen Seiten dar, die als Kabelkanäle oder zur Befestigung genutzt werden können.

(Ein weiterer bekannter Hersteller von Profilsystemen ist R+K Rose&Krieger, die ein ähnliches Programm anbieten.)

Das „Rückrad“ der Konstruktion stellt ein 20x80 mm Profil dar, an dem Linearführung, Muskel und Antrieb angebracht werden. Der Rest des Gestells wird mit Standard 20x20 mm Profilen gebaut.

Die Verbindung der Profile geschieht durch Standardverbindungsätze. Sie sind belastbar und preiswert. Allerdings müssen die Profile vorher entsprechend bearbeitet werden. (Bohren und Gewindebohren). Die Position der Verbindungsstelle lässt sich nicht ohne weitere spanende Bearbeitung verschieben.

Zusätzlich gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Bauelemente, wie Scharniere, Füße, Schutzleisten usw., mit denen man die Konstruktion vervollständigen kann.

Mögliche Verbesserungen

- Verwendung von Automatikverbindungsätzen. Sie sind wesentlich leichter einzubauen und lassen sich nachträglich verschieben.
- Ganz in schwarz würde das Gestell besser aussehen.

4.6 Der Schlitten

Bei der Konstruktion des Schlittens sind keine Auslegungsberechnungen erforderlich. Es ist nur darauf zu achten, dass die folgenden Anforderungen an den Schlitten erfüllt werden.

Anforderungen

1. Das Jojo soll so gelagert werden, dass es nur noch um die eigene Achse rotieren, und nach oben herausgezogen werden kann. Alle anderen Freiheitsgrade sollen durch Lagerschalen und Führungen festgelegt werden. Rotation und Herausziehen soll einfach möglich sein.
2. Das Eigengewicht des Jojos soll zu einem großen Teil auf der Achse des Wickelantriebs lasten. Die Position des Motors ist entsprechend zu wählen.
3. Die dem Sensor zugewandte Seite soll glatt ausgeführt werden, um den Ultraschallsensor nicht zu stören.

Ausführung

Der Schlitten besteht aus zwei Schalen, die an die Linearführung angebaut werden. Das Jojo wird in zwei Lagerschlitzen, die die Achse des Jojos umschließen, gehalten. Der Wickelantrieb mit samt dem Reibrad wird an der einen Schale des Schlittens angebracht, so dass sich das Reibrad mit dem gelagerten Jojo im Eingriff befindet.

4.7 Die Entlagensensoren

Typ: FESTO SMT-8-PS-K-LED-24-B

Diese Sensoren sind als Zusatz zur Linearführung erhältlich und lassen sich sehr einfach an diese in dafür vorgesehenen Nuten anbringen. Bei Annäherung des Schlittens wird der Sensor magnetisch geschaltet.

Probleme: Bei falschem Anschluss der Spannung brennt der Sensor durch, daher ist mit Sorgfalt bei der Verdrahtung vorzugehen.

4.8 Die Steuerelektronik

Die Beschaltung des Ventils und der Motoren erfolgt über entsprechende Relais (siehe Abb. 11). Diese müssen die Stromstärke beim betrieb der Motoren verkraften. Im Zweifelsfall sollte der Ankerstrom der Motoren beim Betrieb gemessen werden und mit den Spezifikationen der Relais verglichen werden.

Die Datenerfassung und Steuerung der Relais erfolgt über eine DAQCard™-700 von National Instruments®. Mit der „Data Aquisition Toolbox“ unter MATLAB werden die Signale vom Jojo ausgelesen und die Steuersignale für die Relais ausgegeben.

5 Fertigung und Zusammenbau

Das Jojo wie es in dieser Arbeit entstanden ist, bzw. modifiziert wurde, ist kein Produkt im eigentlichen Sinne, für das man eine genaue Fertigungsanweisung geben kann; es ist vielmehr ein Einzelstück - eine Studie.

Wollte man das Jojo nachbauen, so wäre es eine schlechte Vorgehensweise genau die selben Teile wie in der vorliegenden Arbeit zu verwenden; das Aussehen des Jojos wurde maßgeblich von der Verfügbarkeit der Materialien und den Fertigungsmöglichkeiten vor Ort bestimmt. Daher wird im folgenden Kapitel nur jeweils grundlegend auf Möglichkeiten und Probleme beim Zusammenbau eingegangen.

Zum Schluss wird eine Vorgehensweise zur erfolgreichen Konstruktion eines Jojos, basierend auf den während der Arbeit gesammelten Erfahrungen, vorgeschlagen.

5.1 Das Maxwellrad und seine Aufhängung

Die Fertigung des Maxwellrads war nicht Gegenstand der Arbeit, trotzdem wird an dieser Stelle kurz auf den Einbau und auf Probleme eingegangen, die bei der Fertigung des Rades eine Rolle spielen.

5.1.1 Das Maxwellrad

Das Vorliegende Bauteil besteht aus einer gedrehten Messingscheibe, durch die eine ebenfalls gedrehte, an den Enden geschlitzte Messingachse gesteckt wurde (für genaue Maße siehe 4.1). Diese Konstruktion bringt spezielle Problem mit sich auf die noch eingegangen wird.

5.1.2 Aufhängung am Muskel

Der Faden des Jojos muss irgendwie am Muskel angebracht und gegen verrutschen gesichert werden. Dies geschieht über ein einfaches Bauteil, in dem der Faden eingefädelt wird, bevor er am Jojo angebracht wird. Die Sicherung geschieht nach Justierung des Jojos mit einem Klecks Klebstoff. Eine verbesserte Klemmevorrichtung könnte den Vorgang wesentlich vereinfachen.

5.1.3 Befestigung des Fadens an der Achse

Der Faden wird in die Ritze am äußeren Ende der Achse eingelegt und mit Klebstoff (Epoxid oder Industriegesekundenkleber) fixiert. Dies erfordert leider ein wenig Geduld und Geschick. Besonders die Reinigung der Schlitzes von ausgehärteten Klebstoffresten, wenn der Faden einmal ersetzt werden muss, kann sehr mühselig sein.

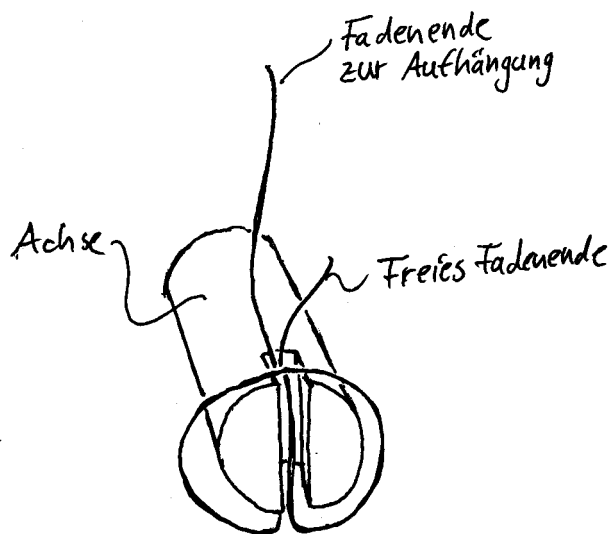


Abb. 15: Das Fadenende wird durch den Schlitz gezogen und dann in einer Schlaufe um die Achse gelegt.

5.1.4 Probleme

Ein Schwachpunkt der gesamten Konstruktion ist das Maxwellrad selbst. Das Hauptproblem ist dabei, dass zwischen den Achsdurchmessern auf beiden Seiten eine Abweichung von ca. 0,1 mm besteht. Diese führt beim Aufwickeln zu einer zunehmenden Schiefelage, da pro Umdrehung auf der einen Seite mehr Seil als auf der anderen aufgewickelt wird. Dies macht einerseits der Aufrollautomatik Probleme, andererseits wird auch der Betrieb des Jojos unsicherer.

Als Gegenmaßnahme sollte die Fallhöhe des Jojos möglichst klein gewählt werden, was die ganze Vorführung natürlich weniger spektakulär macht.

Probleme sind auch beim Einfädeln zu verzeichnen. Besser gelingt es bei der Größeren Jojovariante, die statt mit Schlitzten mit Löchern in der Achse ausgestattet ist.

Insgesamt wäre es gut, ein völlig neues Maxwellrad mit verkleinerten Grundmaßen, und verbesserter Toleranz des Achsdurchmessers und Lochtechnik zum Einfädeln aus Plastik zu bauen.

5.2 Das Gestell

Das Gestell wird, wie bereits erwähnt, aus einem Aluminiumprofilsystem des Herstellers ITEM gefertigt. Für die Verbindung der Profilverteile mit dem Standardverbindingssatz muss jeweils noch gebohrt und Gewinde geschnitten werden. Die Winkelemente benötigen nur noch Gewindeschneiden zur Befestigung.

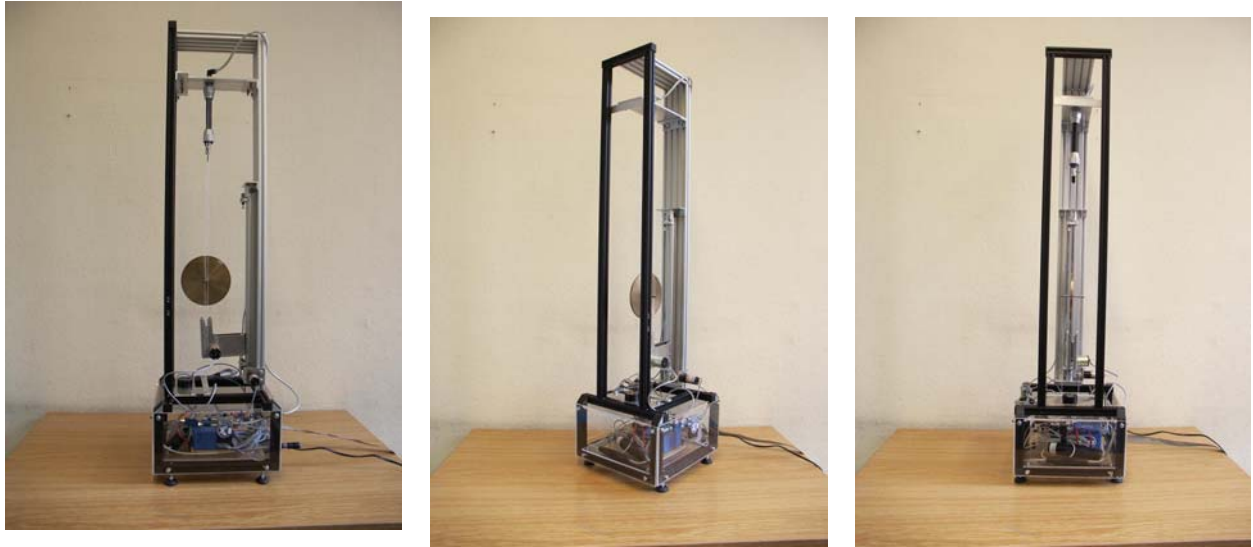


Abb. 16: Das fertige Jojo aus drei verschiedenen Blickwinkeln

5.2.1 Zusammenbau

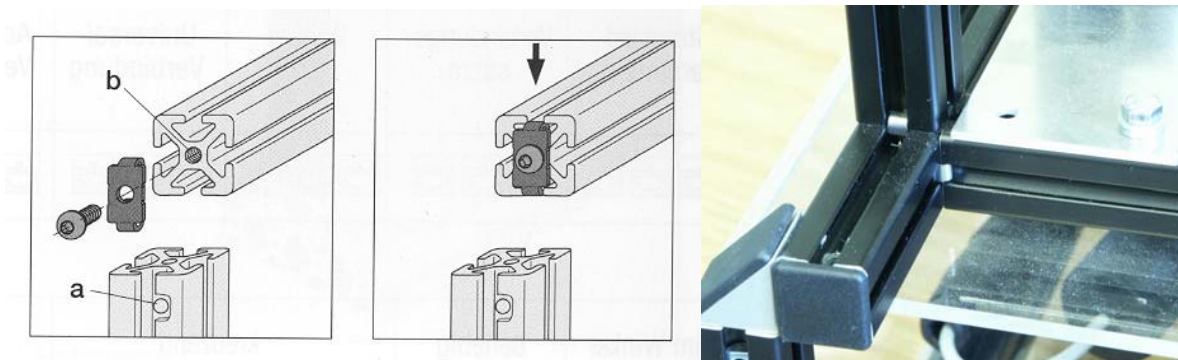


Abb. 17: Einbau eines Standardverbindingssatzes. Das Verbinderplättchen wird auf der Stirnseite des Profils mit der Schraube im M5er Loch (b) angebracht. Dann wird es in die Führungsnut eingeschoben und mit einem Sechskantschlüssel durch das 4,3er Loch (b) endgültig fixiert. (Abbildung aus dem Katalog entnommen)



Abb. 18: Der Winkel kann entweder mit Nutensteinen in den Führungsnuten angebracht, oder an der Stirnseite eines Profils angebracht werden. Im zweiten Fall muss noch ein entsprechendes Gewinde vorgesehen werden.

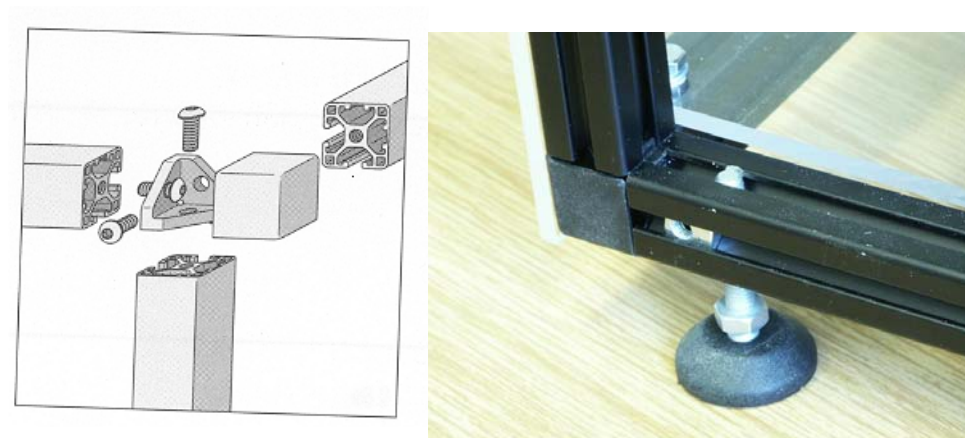


Abb. 19: Für eine Stoßverbindung von drei Profilen gleichen Typs wird der „Verbinder 20x20x20“ verwendet. Es muss jeweils ein Gewinde in die Stirnseite der Profile geschnitten werden.

5.3 Schlitten

Zur Fertigung des Schlittens wird eine gute Werkstattsausrüstung benötigt, da eine hohe Maßgenauigkeit erforderlich ist, um einen einwandfreien Betrieb der Wickelautomatik zu gewährleisten. Der Einbau des Schlittens ist jedoch sehr einfach.



Abb. 20: Links – Demontierte Einzelteile des Schlittens. Zwei Schalen aus 2mm Alublech (eine davon mit montiertem Wickelmotor), zwei Abstandhalterklötzchen, M3 Schrauben und Muttern. Rechts – Schlitten mit Jojo in der Lagerschale.

5.4 Die Linearführung

Die Linearführung wurde als Kaufteil erworben, bzw. freundlicher Weise von der Firma FESTO zur Verfügung gestellt. Es müssen nur einfache Teile für den Anbau an das Gestell und den Anschluss des Motors gefertigt (siehe Abb. 21 und Abb. 22) werden. Um das Antriebsmoment vom Motor auf die Führung zu übertragen wurde eine Rotex-Kupplung von CONRAD verwendet. Die Befestigung der Anschlusselemente am Gestell geschieht mit Nutensteinen.



Abb. 21: Linearführung mit montierten Winkelblechen, Endlagendämpfern und Kupplung.



Abb. 22: Ankopplung des Antriebsmotors (Maxon A-max 22 mit Getriebeaufsatz) an die Linearführung mit Hilfe der Rotex-Kupplung

5.5 Der Muskel

Eine Robuste Platte nimmt die Kräfte auf, die während des Betriebs auf den Muskel wirken, und leitet sie über das Gestell ab. Ein durchsichtiges Führungsrohr aus Kunststoff verhindert bei der früheren Jojovariante laterales Ausschlagen des Muskels beim Anziehen. Das Rohr wird bei der aktuellen Variante weggelassen.

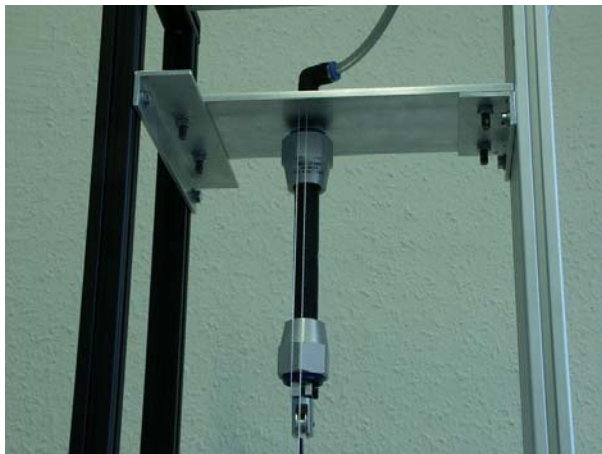


Abb. 23: Muskel und Anschlussplatt

5.6 Das Führungsseil

Da das Jojo im Betrieb zur Rotation um die vertikale Achse neigt, werden Führungsseile vorgesehen, die eben dies verhindern sollen. Als Material wird ein 0,3 mm starkes Dynamaseil verwendet, das durch Löcher in der Muskelhalterplatte und einem Fadenhalter, der weiter unten am Gestell angebracht wurde. Nachdem es korrekt eingefädelt wurde,

werden die Enden des Seils verknotet, und können mit einem tropfen Klebstoff gegen Lösen gesichert werden.

Das Führungsseil wird gespannt, indem die Muskelhalterplatte nach oben verschoben wird, bis eine ausreichende Spannung erreicht ist. In dieser Position wird die Muskelplatte durch Festschrauben der Nutensteine fixiert. Möglicherweise muss vorher der untere Fadenhalter gelöst werden, der später auf einfachere Weise wieder angeschraubt werden kann.

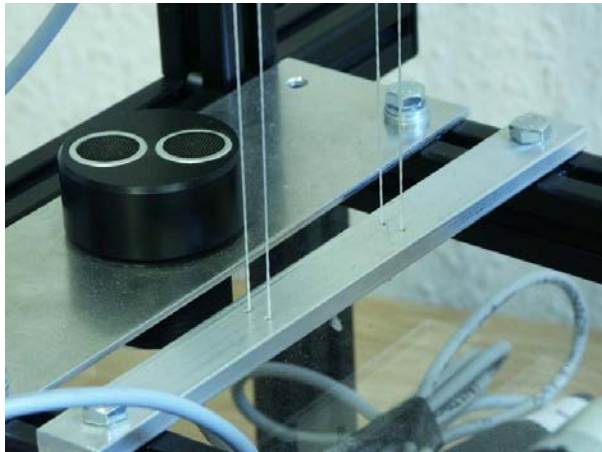


Abb. 24: Befestigung der Führungsseile

5.7 Anschlüsse

Das Jojo benötigt, um zu funktionieren Druckluft und Strom zur Versorgung von Muskel, Antrieben und Sensoren, des weiteren wird ein mit AD/DA-Wandlerkarte ausgerüsteter PC und eine Relaisplatine benötigt.

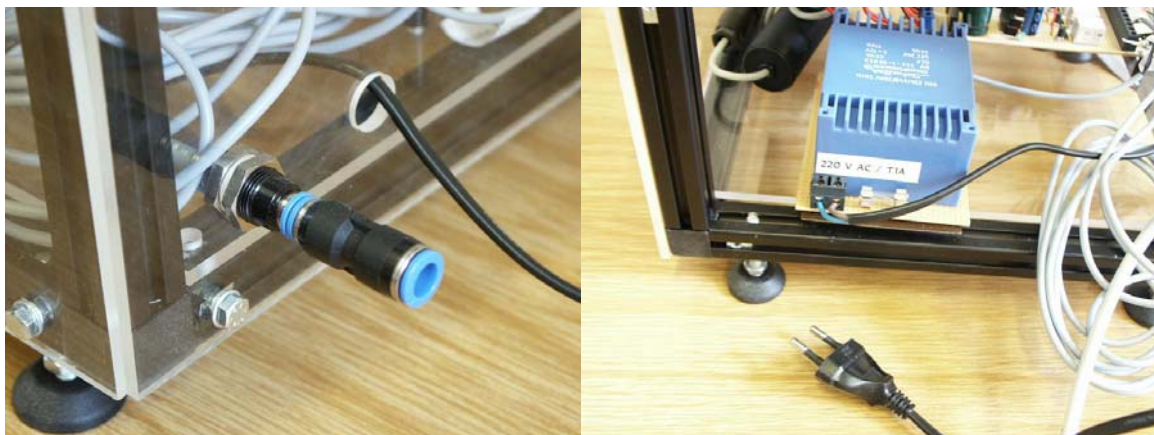


Abb.25: Anschlüsse für Druckluftversorgung und Strom (220 V)

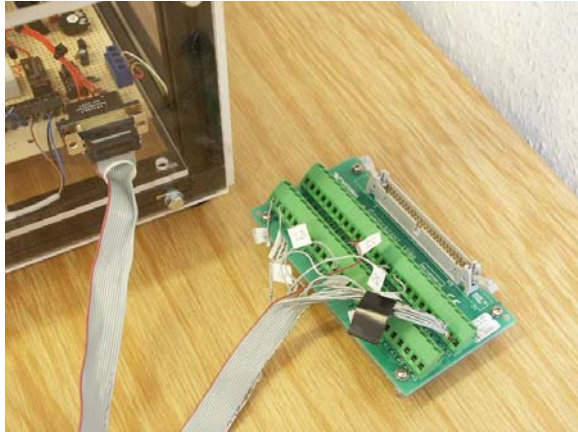


Abb.26: Verkabelung der Elektronik

5.8 Anleitung zur Fertigung

Die Fertigung eines Jojos ist vom reinen Arbeitsaufwand her ein überschaubares Unterfangen, allerdings gilt dies nur, wenn entsprechende finanzielle Mittel und eine gut ausgestattete Werkstatt zur Verfügung stehen. Trotz des wirklich sehr einfachen Konzeptes der Wickelautomatik sind zur Realisierung sehr teure Einzelteile nötig.

5.8.1 Kostenabschätzung

Maxwellrad (fremd gefertigt)	ca. 400 €
Muskel	ca. 50 €
Linearführung	ca. 250 €
Antriebsmotor	ca. 150 €
AD/DA Wandlerkarte	ca. 200 €
Relaiskarte	ca. 200 €
Ventil	ca. 50 €
Ultraschallsensor	ca. 150 €
Alu-Profile	ca. 250 €
Plexiglas	ca. 50 €
	<hr/>
	1700 €

Dazu kommen Maschinenzeiten und Personalkosten beim Fertigen von Schlitten und Anschlussteilen.

5.8.2 Zeitabschätzung

Es sind einige zeitraubende Arbeitsschritte bis zur Realisierung eines funktionsfähigen Jojos nötig. Wollte man ausgehend von dieser Ausarbeitung ein neues Jojo erstellen, sollte man entsprechend Arbeitszeit einplanen (Bei einem Aufwand von ca. 15 Stunden in der Woche, ohne Erfolgsgarantie!):

- Auslegung und Fertigung und Test eines neuen Maxwellrads: 1 Woche
- Auslegung und Fertigung der Wickelautomatik samt Antriebsmotoren: 3 Wochen
- Konstruktion und Fertigung eines Gehäuses: 2 Wochen
- Fertigung von Anschlussteilen und Zusammenbau des Jojos: 1 Woche

Zum Programmieren der Steuerung ist darüber hinaus noch einige Zeit einzuplanen, eine entsprechende Software ist natürlich Voraussetzung.

Insgesamt sollten also 8 Wochen (entspricht 120 Stunden) für den Aufbau eingeplant werden. Rechnet man noch Verzögerungen durch Lieferzeiten ein, sind wohl eher 10 - 12 Wochen realistisch, während denen man sich mehr oder weniger um den Aufbau kümmern muss.

5.8.3 Der Weg zum eigenen Jojo

Bevor mit dem Bau des Jojos begonnen werden kann sind einige Vorüberlegungen zu treffen:

1. Entscheiden Sie die Größe des Jojos (Hub und Maße des Maxwellrads)
2. Treffen sie eine Entscheidung ob sie ein Jojo mit einer Wickelautomatik wollen – wird die Wickelautomatik weggelassen, vereinfacht und verbilligt sich die Fertigung des Jojos ganz erheblich
3. Vergewissern sie sich, ob genügend finanzielle und fertigungstechnische Ressourcen vorhanden sind.
4. Legen Sie sich fest, wie genau sie das Steuerkonzept realisieren wollen, stellen sie die Funktionsfähigkeit ihres Konzepts durch Tests von Soft- und Hardware ihres PCs sicher.

Das Herzstück des Jojos ist das Maxwellrad. Mit der Qualität des Rades steht und fällt die gesamte Konstruktion. Daher sollte das Rad als erstes gefertigt und auf Herz und Nieren getestet werden, ehe weitere Teile gebaut oder gekauft werden.

- Achten sie bei der Auslegung auf die Beachtung der Gestaltungsempfehlungen die in Kapitel 1 gegeben wurden.
- Überlegen Sie eine Fertigung des Maxwellrads aus Kunststoffhalbzeugen.

- Achten sie auf einen konstanten Achsdurchmesser.
- Achse und Rad müssen gut fluchten, um ein „Eiern“ des Rades zu verhindern.

Nach den Vorüberlegungen und der Fertigung des Rades, erfolgt die Auslegung der Konstruktion in Abhängigkeit von der Gestalt des Maxwellrades. Dabei wird in folgender Reihenfolge vorgegangen:

1. Wahl einer Linearführung mit entsprechenden Spezifikationen
2. Wahl der Antriebe
3. Konstruktion des Schlittens
4. Konstruktion des Gehäuses (Hier gibt es Freiraum für gestalterische Ideen)

Gehen sie bei der Auslegung der einzelnen Komponenten nach den in Kapitel 4 gemachten Empfehlungen vor.

Als letztes müssen die Teile beschafft werden, dafür sollte einige Zeit eingeplant werden, nicht alle Produkte sind ab Lager erhältlich. Der Zusammenbau der Einzelteile sollte dann relativ einfach verlaufen.

Literaturverzeichnis

- [1] Gross, Haugner, Schnell - *Technische Mechanik 1-3*, Springer 1995
- [2] Siekmann – *Strömungslehre*, Vorlesungsskript 1998
- [3] Kolja – *Konstruktion eines pneumatisch betriebenen Jojos*, Studienarbeit am Fachgebiet für Bionik und Evolutionsstrategie 2000
- [4] Pahl, Beitz – *Konstruktionstechnik*, Springer 1998