

Studienarbeit

**Entwicklung eines Versuchsaufbaus für die Demonstration
eines pneumatischen Aktuators unter Verwendung einer
Microcontrollersteuerung**

von

cand.-Ing. Kolja Kühnlenz

Berlin, 2001

Inhalt

1	EINLEITUNG	5
2	YO-YO UND MAXWELL'SCHES RAD	6
2.1	Historische Betrachtung	6
2.2	Energie und Kinematik des Maxwell'schen Rades.....	7
2.2.1	<i>Energiebilanz</i>	<i>7</i>
2.2.2	<i>Bewegungsgleichung</i>	<i>8</i>
2.2.3	<i>Bahnkurve.....</i>	<i>9</i>
2.2.4	<i>Der Umkehrpunkt</i>	<i>10</i>
2.2.5	<i>Verlustenergien</i>	<i>12</i>
2.3	Ausgleich der Reibungsverluste	13
2.4	Zusammenfassung	14
3	PRÄZISIERUNG DER AUFGABENSTELLUNG	15
4	MATERIALIEN	15
4.1	Die Entwicklungsumgebung LabVIEW™.....	15
4.2	Multifunktionsmeßkarte PCI-6023E.....	16
4.3	Ultraschallsensor 301V	17
4.4	C-Control.....	18
4.5	Dyneema SK 75	19
4.6	3/2-Magnetventil	19
4.7	Der pneumatische Aktuator MAS10-N80-AA-MCFK.....	20
5	UNTERSUCHUNG EINES ULTRASCHALLSENSORS	22
5.1	Ziel des Versuchs.....	22
5.2	Vorgehensweise.....	22
5.3	Meßergebnis	22
5.4	Auswertung	22
6	KONZEPTION DES VERSUCHSAUFBAUS (MECHANIK).....	24
6.1	Anforderungskatalog.....	24
6.2	Version 1.0	25
6.2.1	<i>Konzept</i>	<i>25</i>

6.2.2	<i>Realisierung</i>	26
6.2.3	<i>Bewertung</i>	28
6.3	Version 1.1	30
6.3.1	<i>Konzept</i>	30
6.3.2	<i>Realisierung</i>	31
6.3.3	<i>Bewertung</i>	32
6.4	Version 1.2	34
6.4.1	<i>Konzept</i>	34
6.4.2	<i>Realisierung</i>	34
6.4.3	<i>Bewertung</i>	35
6.5	Zusammenfassung	36
7	KONZEPTION DES VERSUCHSAUFBAUS (PNEUMATIK)	37
7.1	Grundprinzip	37
7.2	Mögliche Realisierungen	37
7.2.1	<i>Ein 2/2-Wegeventil</i>	37
7.2.2	<i>Zwei 2/2-Wegeventile</i>	38
7.2.3	<i>Ein 3/2-Wegeventil</i>	38
7.3	Bewertung und Auswahl der geeigneten Realisierung	39
8	STEUERUNGSELEKTRONIK	39
8.1	Rechnergestützte Steuerung	40
8.1.1	<i>Realisierung durch Software in-the-loop</i>	40
8.1.2	<i>Realisierung durch Programmierung eines Counterchips</i>	41
8.2	Einsatz eines Microcontrollers	42
9	STEUERUNGSSOFTWARE	43
9.1	Grundprinzip	43
9.2	Rechnergestützte Steuerung	43
9.2.1	<i>Realisierung durch Software in-the-loop</i>	43
9.2.2	<i>Realisierung mittels Programmierung eines Counterchips</i>	45
9.3	Einsatz eines Microcontrollers	47
9.4	Bewertung	48
9.5	Zusammenfassung	48
10	VERLAUF DER HÖHENMAXIMA DES MAXWELL'SCHEN RADES	49

11 SPANNUNGSVERSORGUNG	50
12 ABSCHLIEßENDE BETRACHTUNG DES VERSUCHSAUFBAUS	51
12.1 Bahnkurve des Maxwell'schen Rades	51
12.1.1 <i>Rechnergestützte Messung</i>	51
12.1.2 <i>Auslaufversuch</i>	52
12.1.3 <i>Verlauf der Maximalhöhen des Maxwell'schen Rades bei aktiver Steuerung</i>	54
12.1.4 <i>Zeitdiagramm</i>	55
12.1.5 <i>Einstellungen</i>	55
12.2 Gesamtbewertung der Funktionalität	55
12.3 Steuerung vs. Regelung	56
12.4 Verbesserungsvorschläge	56
13 ZUSAMMENFASSUNG	57
14 LITERATURVERZEICHNIS	58

1 Einleitung

Die Firma Festo AG entwickelte einen pneumatischen Aktuator, dessen Kinematik äußerlich der eines Muskels ähnelt. Bei einer Beaufschlagung mit einem Druck führt dieser eine Längenkontraktion aus, welche über innere kinematische Beziehungen aus einer Querexpansion resultiert.

Die Erstentwicklung des der Kinematik des Aktuators zugrundeliegenden Funktionsprinzips geht zurück auf ein Forschungsprojekt, welches sich in den 50er Jahren mit der Entwicklung künstlicher Gliedmaßen befaßte. Pneumatische Aktuatoren auf Basis dieses sog. McKibben Muskels wurden in den späten 80er Jahren von der Firma Bridgestone Japan für Anwendungen im Bereich der Robotik kommerzialisiert. [1]

Aktuell befassen sich Wissenschaftler des Fachbereiches Bionik und Evolutionstechnik der Technischen Universität Berlin mit der mathematischen Modellierung der physikalischen Eigenschaften des Festo-Aktuators, um dessen Kinematik gezielt in der Entwicklung von Robotikkomponenten einsetzen zu können.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Versuchsaufbaus, welcher die Funktion dieses Aktuators in anschaulicher Weise demonstriert. Hierfür wurde das klassische Prinzip eines Yo-Yo-Spielers als repräsentatives Anschauungsobjekt gewählt. Der Aktuator erfüllt die Funktion des Armes, welcher dem Yo-Yo die während des Bewegungsvorganges verlorengegangene Energie in Form eines Impulses am Umkehrpunkt wieder zuzuführen sucht.

Nach grundlegenden Betrachtungen der Kinematik und der Energien des Yo-Yo wird der mechanische und pneumatische Versuchsaufbau konzipiert und realisiert. Die Steuerung des Prozesses erfolgt auf Basis eines Mikrocomputers. Der Steueralgorithmus wird vorerst auf einem PC unter Verwendung der Entwicklungsumgebung LabVIEW™ und einer Datenerfassungskarte von National Instruments entwickelt und bei Funktionsfähigkeit anschließend auf einem Microcontroller implementiert, um letztlich ein leicht transportables autonomes Präsentationsobjekt für diesen Aktuator zu erhalten.

2 Yo-Yo und Maxwell'sches Rad

2.1 Historische Betrachtung

Das Yo-Yo, wie wir es kennen, ist ein sehr altes Spielgerät. Auf einer attischen 450 v. Chr. geformten Schale, die sich im Besitz des Berliner Antikemuseums befindet, ist ein YoYo-spielender Jüngling abgebildet - ein Indiz dafür, daß das YoYo schon im antiken Griechenland bekannt war. Legenden zufolge soll in grauer Vorzeit auf den Philippinen eine Art Jagdwaffe in Form eines an einem Lederriemen befestigten eingekerbten Steines genutzt worden sein. Dieses Wurfgeschöß konnte von einem



Abbildung 1 : Bild auf attischer Schale 450 v. Chr.



Abbildung 2 : Druck, Frankreich 1792 n. Chr.

sich erhöht befindenden Jägers nach dem Abwurf yoyoartig wieder nach oben gezogen werden.

Ausgehend von Frankreich verbreitete sich im 18. Jahrhundert das Yo-Yo als Spielgerät in ganz Europa. Ein Druck von 1792 n. Chr. Zeigt yoyospielende Soldaten aus der Armee Frankreichs. Seit dem 20. Jahrhundert ist Amerika die Heimat und erneuernde Kraft für das Yo-Yo-Spiel. Der Amerikaner Donald F. Duncan verhalf dem Konzept der Schlaufe um die Yo-Yo-Achse zum Durchbruch und kaufte gegen Ende der zwanziger Jahre die Yo-Yo-Firma des Philippinen Pedro Flores und den Namen Yo-Yo™. Dieser Name etablierte sich zunehmend weltweit und ist heute allgemeines Sprachgut und die Bezeichnung für jede Art von Yo-Yo. [6]

2.2 Energie und Kinematik des Maxwell'schen Rades

2.2.1 Energiebilanz

Eine Variation des klassischen Yo-Yo's ist das Maxwell'sche Rad. Hierbei handelt es sich um eine Schwungscheibe mit großem Trägheitsmoment I , auf dessen zentraler Achse bifilar ein Faden aufgewickelt ist, was das Maxwellrad auf eine vorgebbare Höhe über einer tiefstmöglichen Lage bringt. Damit verbunden ist eine Zunahme der potentiellen Energie. Das Rad wird zentral an jenem Faden aufgehängt und das System wird nach Erreichen der Ausgangslage sich selbst überlassen.

Das Rad "fällt" langsam beschleunigt nach unten, und beginnt sich gleichzeitig zu drehen. Am tiefsten Punkt angekommen kehrt sich die Bewegungsrichtung um, das Rad "steigt" hoch, langsamer werdend und bis zu der bei Beginn des Versuchs eingestellten Ausgangslage. Dieser Versuchsablauf wiederholt sich bis die zusätzlich bei Versuchsbeginn eingebrachte potentielle Energie durch Reibungsverluste aufgebraucht ist und das Rad in seiner tiefstmöglichen Lage zur Ruhe kommt.

Sobald sich das Rad in Bewegung setzt, wird Energie der Lage in kinetische Energie gewandelt. Die Bewegung ist aber kein freier Fall, da Fallbewegung und Drehbewegung des Rades gleichzeitig geschehen. Diese beiden Bewegungen sind durch eine Abrollbedingung miteinander verbunden und stellen sich in systemspezifischem Verhältnis zueinander ein. Für den tiefsten Punkt der Bewegung gilt: die eingebrachte potentielle Energie ist voll in Bewegungsenergie gewandelt. Sie ist in Energie der Fortbewegung und der Rotation umgesetzt. Die Abrollbedingung muß eingehalten werden.

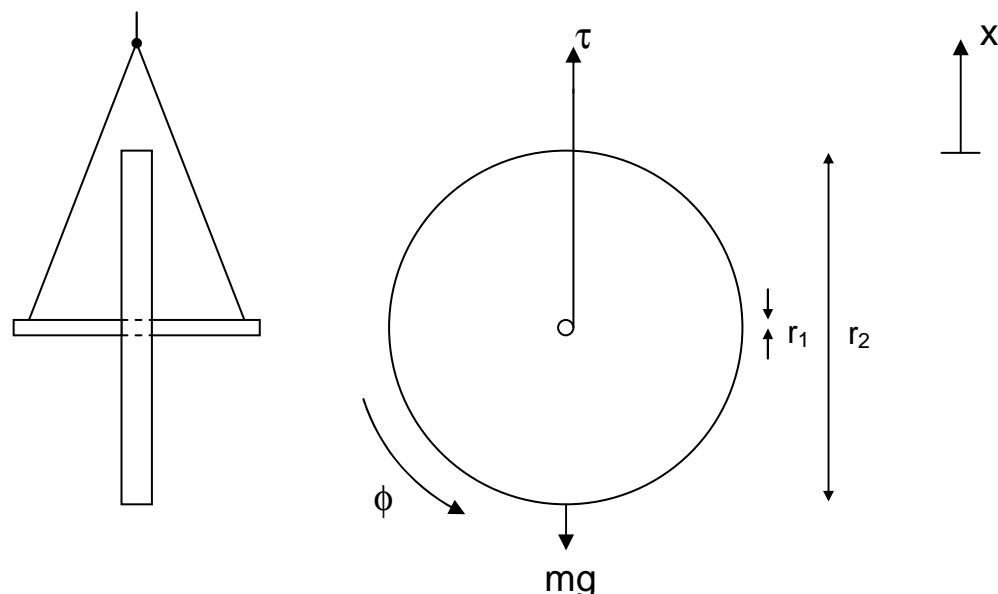


Abbildung 3 : Maxwell'sches Rad, Prinzipskizze

Analog zu den o.g. Betrachtungen läßt sich die Lagrangefunktion herleiten [7] :

$$L = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} I \dot{\phi}^2 - mgx$$

Gleichung 1

So ergibt sich die Energiebilanz für die Ausgangsgesamtenergie mit der Potentialdifferenz aus dem Höhenunterschied h unter Vernachlässigung dissipativer Kräfte zu [8]

$$mgh = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}I\dot{\varphi}^2 - mgx \quad \text{Gleichung 2}$$

2.2.2 Bewegungsgleichung

Die Abrollbedingung liefert die Zwangsbedingung

$$f(x, \varphi) = x \mp r\varphi = 0 \quad \begin{cases} \text{aufsteigendes} \\ \text{absteigendes} \end{cases} Y_O - Y_0 \quad \text{Gleichung 3}$$

Nach Verschiebung des Nullpunktes für x in den Umkehrpunkt und der Zwangsbedingung ergibt sich [8]

$$mg(h-x) = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}\frac{I}{r^2}\dot{x}^2 = \frac{1}{2}m\left(1 + \frac{I}{mr^2}\right)\dot{x}^2 = \frac{1}{2}(mk)\dot{x}^2 \quad \text{Gleichung 4}$$

Daraus läßt sich ableiten, daß das System sich wie ein Massepunkt der trägen Masse (mk) im Gravitationsfeld verhält.

Umformen der Gleichung nach der Geschwindigkeit liefert [8]

$$v(x) = \dot{x} = \sqrt{\frac{2g(h-x)}{1 + \frac{I}{mr^2}}} = \sqrt{2\frac{g}{k}(h-x)} = \sqrt{2a(h-x)} \quad \text{Gleichung 5}$$

Der „Massepunkt“ führt also offensichtlich eine gleichförmig beschleunigte Bewegung gleich der eines freien Falls von der Höhe h aus, wobei er eine reduzierte Erdbeschleunigung a erfährt [8] :

$$a = \frac{g}{k} = \frac{g}{1 + \frac{I}{mr^2}} \quad \text{Gleichung 6}$$

Diese Bewegung wird bis zum Umkehrpunkt fortgesetzt. Dort wird kurzzeitig die gesamte Translationsenergie in elastische Energie der Fäden und der übrigen Aufhängung umgesetzt und dort punktuell gespeichert, wonach diese schließlich als Translationsenergie wieder zurückgegeben wird, woraus letztlich eine Aufwärtsbewegung des Maxwellrades resultiert. Der gesamte Bewegungsablauf gleicht bis jetzt dem eines springenden Balles oder versetzt dem eines senkrechten Wurfes nach oben.

2.2.3 Bahnkurve

Berücksichtigt man zusätzlich noch dissipative Kräfte wie im wesentlichen Haftreibung und viskose Verluste, so ergibt sich unter kontinuierlicher Fortsetzung der beschriebenen Bewegung ein abklingendes Oszillieren, bis das System letztlich nach kompletter Umsetzung der Anfangsenergie in Verlustenergie am Umkehrpunkt der Höhe $x=0$ zur Ruhe kommt.

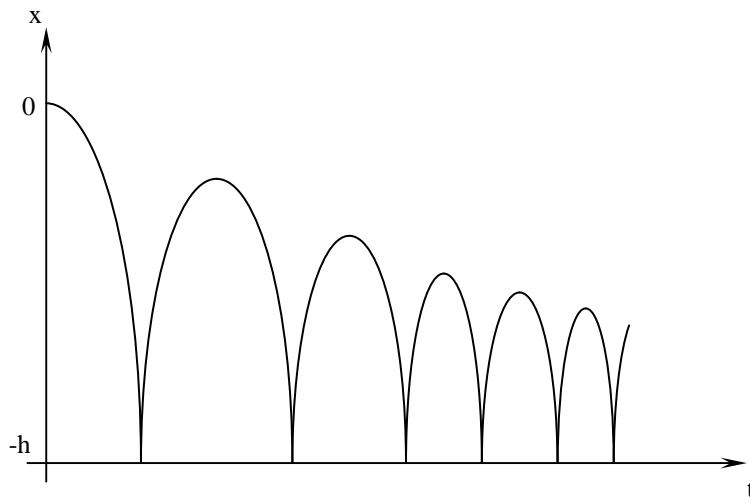


Abbildung 4 : Bahnkurve Maxwell'sches Rad

Geschwindigkeit und Beschleunigung des Maxwellrades verhalten sich dann wie in Abb. 5 gezeigt.

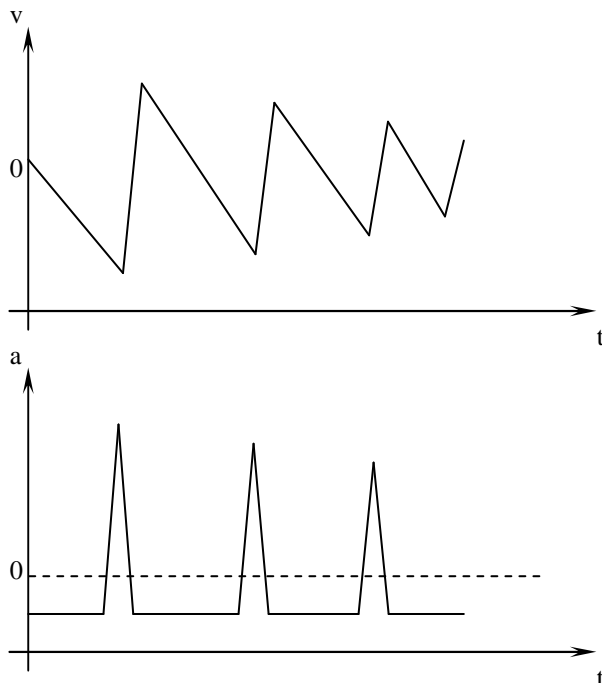


Abbildung 5 : Geschwindigkeit und Beschleunigung Maxwell'sches Rad

Es handelt sich nach Gl. 5 um eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung, sofern während der Ab- und Aufwärtsbewegung keine dissipativen Kräfte auftreten. Der Graph der Geschwindigkeit (s. Abb. 5) muß daher für diese Abschnitte lineare

Funktionen widerspiegeln, deren Steigungen identisch sein müssen. Die konstante Beschleunigung ist für diesen Bereich konstant negativ, wie in Abb. 5 zu erkennen.

2.2.4 Der Umkehrpunkt

Der Bewegungsablauf am Umkehrpunkt gleicht dem eines elastischen Stoßes eines Massepunktes mit einem Körper unendlicher Masse. Kinetische Energie wird kurzzeitig in Form von elastischer Energie gespeichert. Die Beschleunigung über die Zeit bildet dann einen Diracimpuls, wenn dies ohne zeitliche Ausdehnung geschieht, da die Geschwindigkeit an dieser Stelle eine Unstetigkeit zeigt. Real existiert eine gewisse zeitliche Ausdehnung, so daß die Bewegung nach [10] die Form eines Stoßes annimmt :

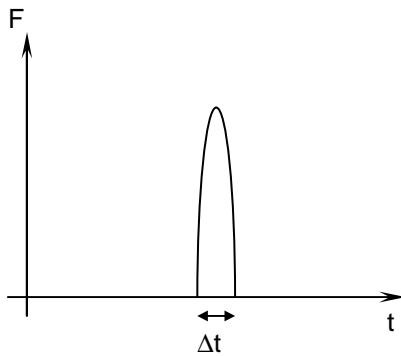


Abbildung 6 : Stoß am Umkehrpunkt

$$S = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} F dt$$

Gleichung 8

Um den elastischen Stoß des Maxwellrades am Umkehrpunkt zu quantifizieren, betrachte man zunächst einen Körper der Masse m . Dieser führe eine Trägheitsbewegung aus, also geradlinig gleichförmig :

$$\vec{r} = \vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t$$

Gleichung 7

Nun solle er sich zur Zeit $t=t_1$ durch einen kurzzeitigen Stoß in eine solche Trägheitsbewegung geführt werden, daß er sich zum Zeitpunkt $t=t_2$ an einem Ort a befinde :

$$\vec{a} = \vec{r}(t_2) - \vec{r}(t_1) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t_2 - (\vec{r}_0 + \vec{v}_0 t_1) = \vec{v}_0 (t_2 - t_1)$$

Gleichung 9

Es folgt dann für den Stoß

$$\vec{S} = m(\vec{v}_1 - \vec{v}_0) = \frac{m}{t_2 - t_1} (\vec{a} - \vec{r}_0 - \vec{v}_0 t_2)$$

Gleichung 10

Die Stoßwirkung spiele sich nun in der Zeit Δt ab. So läßt sich nun eine mittlere Stoßkraft F_m bestimmen aus

$$\vec{S} = \vec{F}_m \Delta t$$

Gleichung 11

So daß

$$\bar{F}_m = \frac{\bar{S}}{\Delta t}$$

Gleichung 12

Es wurde nun eine Näherung gefunden für die dem Stoß zuzuordnende Kraft, welche für die Zeitdauer Δt aufgebracht werden muß, um dem Körper auf die beschriebene Bahnkurve zu bringen. [10]

Für die Bewegung des Maxwellrades läßt sich diese Betrachtung analog anwenden. Es tritt hier zusätzlich eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung auf. Die Bahnkurve des Schwerpunktes läßt sich auf eine Dimension reduzieren, daher wird im folgenden auf die vektorielle Schreibweise verzichtet.

Es wird folgende Bahnkurve zugrunde gelegt :

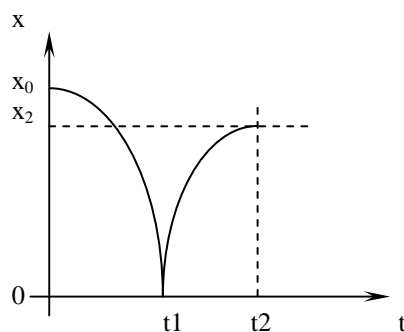


Abbildung 7 : Bahnkurve Maxwell'sches Rad, Stoßberechnung

Angesetzt wird

$$x_1 = x(t_1) = x_0 - v_0 t_1 - \frac{1}{2} a t_1^2$$

Gleichung 13

So ergibt sich analog

$$x_2 = x(t_2) = \underbrace{a t_1}_{v_2} (t_2 - t_1) - \frac{1}{2} a (t_2 - t_1)^2$$

Gleichung 14

Und letztlich für den Stoß am Umkehrpunkt

$$S = m(v_0 + a t_1 - v_2)$$

Gleichung 15

So daß man wiederum eine mittlere Kraft zuordnen könnte :

$$F_m = \frac{S}{\Delta t}$$

Gleichung 16

2.2.5 Verlustenergien

Während des Bewegungsablaufes verliert das Maxwellrad kontinuierlich an Energie, so daß es, sofern dem System von außen keine Energie zugeführt wird, irgendwann in der Nulllage des Umkehrpunktes zur Ruhe kommt.

Dieser Energieverlust ist im wesentlichen auf drei Arten dissipativer Kräfte zurückzuführen :

- Haftreibung
- Gleitreibung
- Luftreibung
- Viskosität (geschwindigkeitsproportionale Dämpfung)

Haft- und Gleitreibung treten zwischen den Fäden und der Achse des Maxwellrades auf, sowie auch zwischen diesem und eventuellen, die Bahnkurve stützenden Führungselementen. Die Reibung ist im ersten Fall sehr gering, da die entsprechenden Reibungskoeffizienten sehr gering sind (Dyneemafaser, geschlichteter Stahl) bzw. Faden und Achse kaum eine Relativbewegung zueinander ausführen. Im zweiten Fall ist die Relativbewegung deutlich größer wie auch die Berührungsfläche (s. Abb. 8), so daß diese Verlustarten im wesentlichen durch Kontakt mit den Führungselementen auftreten.

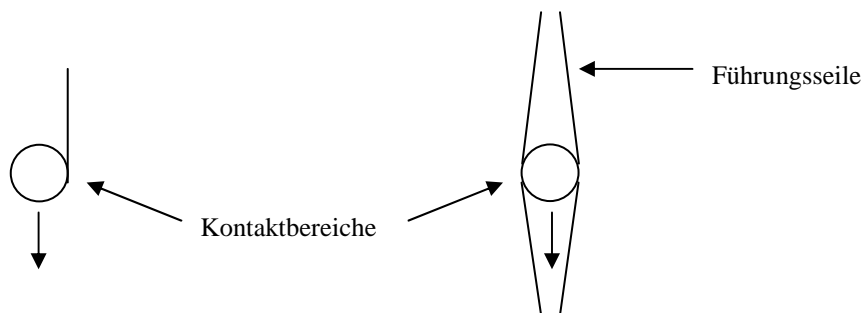


Abbildung 8 : Reibungsverluste, Kontaktbereiche

Der Kontakt mit den Führungselementen ist nicht vorhersehbar. Diese Verluste lassen sich daher nicht quantifizieren.

Die geschwindigkeitsproportionalen Verluste werden hauptsächlich durch die Viskosität des Fadenmaterials und der Aufhängung hervorgerufen. Die Quantifizierung ist prinzipiell analytisch, durch genaue Kenntnis von Materialeigenschaften und Geometrie, wie auch heuristisch, durch entsprechende Versuche, möglich.

Die Quantifizierung der viskosen Verluste ist sehr schwierig und mit hohem Aufwand verbunden, zudem verbliebe in jedem Fall ein unbestimmter Verlustanteil aus der Haft- und Gleitreibung. Aus diesem Grunde wird im folgenden auf eine Berechnung der Verlustenergie verzichtet und keine Prädiktion der dissipativen Kräfte zur Ermittlung der dem System zuzuführenden Energie durchgeführt.

2.3 Ausgleich der Reibungsverluste

Im folgenden soll untersucht werden, wie die Reibungsverluste durch Heben und Senken der Aufhängeeinrichtung des Fadens ausgeglichen werden können. Dazu ist die Fadenspannung zu berechnen.

Zuerst wird die Fadenspannung für den Fall bestimmt, daß ein Teil der Schnur auf der Achse mit Radius r_1 aufgewickelt ist. Die Aufhängeeinrichtung sei in Ruhe.

Aus Gl. 1 ergeben sich zwei Lagrangegleichungen 1. Art :

$$m(\ddot{x} + g) = \lambda \quad \text{Gleichung 18}$$

$$I\ddot{\phi} = \mp r\lambda \quad \text{Gleichung 17}$$

Einsetzen der Zwangsbedingung (Gl. 3) liefert

$$m(\pm r\ddot{\phi} + g) = \lambda \quad \text{Gleichung 19}$$

Elimination von $d^2\phi/dt^2$ führt auf

$$\lambda = \frac{mg}{1 + \frac{mr^2}{I}} \quad \text{Gleichung 20}$$

Wir haben nun eine mathematische Untermauerung der in 2.2.3 angestellten Betrachtung. Die Fadenspannung λ ist also in dem Bereich des Auf- und Abwickelvorganges, in welchem die Schnur teilweise aufgewickelt ist, konstant. [7]

Jetzt wird die Fadenspannung für den Fall berechnet, daß der Faden vollständig abgewickelt ist, das Maxwellrad also in der tiefsten Lage den Abwickelvorgang beendet und zum Aufwickeln ansetzt.

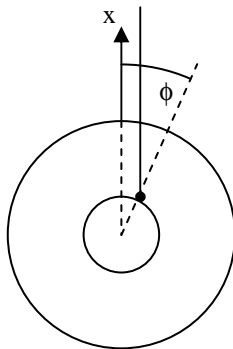


Abbildung 9 : Maxwell'sches Rad im Umkehrpunkt

Im Winkelbereich

$$-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq +\frac{\pi}{2} \quad \text{Gleichung 21}$$

Lautet die Zwangsbedingung nach Abb. 9 :

$$f(x, \varphi) = x + r \cos \varphi = 0 \quad \text{Gleichung 22}$$

Gl. 1 liefert dann die Differentialgleichungen

$$m(\ddot{x} + g) = \lambda \quad \text{Gleichung 23}$$

$$I\ddot{\varphi} = -r\lambda \sin \varphi \quad \text{Gleichung 25}$$

Zweimaliges Differenzieren der Zwangsbedingung (Gl. 22) nach der Zeit führt auf

$$\ddot{\varphi} = \frac{\ddot{x} - r\dot{\varphi}^2 \cos \varphi}{r \sin \varphi} \quad \text{Gleichung 24}$$

Einsetzen in Gl. 24 und Elimination von d^2x/dt^2 ergibt eine Bestimmungsgleichung für λ :

$$\lambda = \frac{mg + mr\dot{\varphi}^2 \cos \varphi}{1 + \frac{mr^2}{I} \sin^2 \varphi} \quad \text{Gleichung 26}$$

Die Fadenspannung λ im Bereich des Umkehrpunktes (Gl. 26) ist definitiv größer als jene in Gl. 20. Demnach läßt sich dem System Energie zuführen, indem der Faden nach oben gezogen wird, wenn er vollständig abgewickelt ist und ihn wieder um die gleiche Strecke absenkt, wenn er zumindest teilweise aufgerollt ist. Auf diese Weise lassen sich die Reibungsverluste ausgleichen. [7]

Die Fadenspannung ist am größten, d.h. die Stoßkraft erreicht ihr Maximum, für $\dot{\varphi}=0$ (s. Abb. 9). Es ist also wünschenswert, daß das Antriebselement seinen größten oder zumindest ausreichenden Impuls an etwa dieser Position erreicht, um möglichst viel Energie an das Maxwellrad zu übertragen. Es wird demnach notwendig sein, das Startsignal durch die Steuereinrichtung ein gewisses Zeitintervall vorher zu senden.

2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde nach einer einführenden historischen Betrachtung das Maxwellrad als Variation des klassischen Yo-Yo's besprochen. Ausgehend von einer Energiebilanz wurde dessen Kinematik erörtert und die entsprechende Bahnkurve erläutert. Anschließend wurde eine Näherung zur Bestimmung der Stoßkraft am Umkehrpunkt anhand der Geschwindigkeiten vor und nach dem Umkehrpunkt ermittelt, mit deren Hilfe sich die Höhenabhängigkeit der Verluste näher untersuchen ließe.

Im nächsten Abschnitt folgte die Darlegung der wesentlichen auftretenden dissipativen Kräfte und die Begründung des Verzichtes auf eine Bestimmung der Verluste zum Zwecke einer Prädiktion aufgrund der mangelnden analytischen Quantifizierbarkeit.

Abschließend wurde gezeigt, daß eine Energiezufuhr von außen grundsätzlich möglich ist und in welcher Weise ein entsprechender an der zentralen Fadenaufhängung angreifender Aktuator diese vornehmen müßte.

3 Präzisierung der Aufgabenstellung

Es ist ein Versuchsaufbau zu entwerfen und zu realisieren, welcher es einem speziellen pneumatischen Aktuator der Firma Festo AG ermöglicht, die durch dissipative Kräfte kontinuierlich entzogene Energie eines Maxwell'schen Rades wieder zuzuführen, um dieses eine konstante Höhe am oberen Umkehrpunkt halten zu lassen. Dazu ist die entsprechende Mechanik, Pneumatik und Elektronik des Steuerungssystems zu entwickeln.

Die Entscheidung, ein Maxwell'sches Rad anstelle eines klassischen Yo-Yo's einzusetzen, folgte aus der Überlegung, daß durch die bifilare Aufhängung einerseits eine höhere Richtungsstabilität der Radachse zu erwarten ist und weiterhin keine Überkreuzungen des Fadens mit sich selbst auftreten können, woraus eine bessere Annäherung des mathematischen Modells in 2.2.2 folgen dürfte.

Die Software für das Steuerungssystem ist zunächst auf Basis der graphischen Entwicklungsumgebung LabVIEW™ (National Instruments) zu entwickeln. Es soll die Entscheidung getroffen werden, den Aktuator mit Hilfe einer Steuerung oder einer Regelung zu kontrollieren. Für die Druckbeaufschlagung des Aktuators sind Magnetventile über die Meßkarte 6023E (National Instruments) durch die Software anzusteuern.

Der Steueralgorithmus ist dann auf einen Microcontroller (C-Control™, Conrad Electronic) zu portieren, um das System PC-unabhängig betreiben zu können.

Für die Erkennung des unteren Umkehrpunktes stehen als Sensorikkomponenten ein Ultraschallsensor (US-Sensor) (301V, Wegener Sensortechnik) sowie ein Piezodrucksensor zur Verfügung. Für eine optimale Steuerung des Prozesses ist der entsprechende Sensor zu selektieren und in das System zu integrieren.

Die fertige Version des Versuchsaufbaus soll bezüglich ihrer Funktionalität analysiert und bewertet werden. Abschließend sind Verbesserungsvorschläge anzugeben.

4 Materialien

4.1 Die Entwicklungsumgebung LabVIEW™

LabVIEW™ (National Instruments) ist eine graphische Entwicklungsumgebung mit starkem Hardwarebezug. Die systemeigene Programmiersprache G ähnelt einem Signalflußplan und hat modularen Charakter. Die Module, sog. VIRTUAL INSTRUMENTS (VIs), verfügen über frei definierbare Schnittstellen (TERMINALS), welche die Ein- und Ausgangsvariablen des VIs zuordnen. Als Datentypen stehen im wesentlichen Integer- bzw. Realtypen bis hin zu 64-Bit-Genauigkeit, sowie Stringtypen, Arrays und beliebige Kombinationen aus diesen, sog. Clusters, in C als Structure bekannt, zur Verfügung. Das DIAGRAMM eines VIs, stellt quasi das eigentliche Programm dar. Hier werden Übergabe- und Zustandsvariablen auf einfache Weise mit Hilfe von Leitlinien (CONNECTORS) über verschiedenartige Operationen miteinander verknüpft. Diese Operationen können z. B. arithmetisch

sein, Strukturen für den Programmablauf darstellen oder auch Unterprogramme, sog. SUB-VIs beinhalten. Ein Sub-VI ist prinzipiell nichts anderes, als ein VI, welches von einem anderen, übergeordneten, VI aufgerufen wird.

Durch den Charakter eines Signalfußplans oder Struktogramms, lassen sich mit dieser Art der Programmierung schnell übersichtliche, in ihrer Funktion relativ leicht zu durchschauende, Module erstellen, welche zudem einfach zu pflegen sind.

Eine weitere Eigenheit dieser Entwicklungsumgebung ist die Möglichkeit, jedem VI eine graphische Oberfläche zuzuordnen. Für die Interaktion des Anwenders mit dem ablaufenden Programm kann so mit den entsprechenden Objekten sehr schnell eine graphische Benutzerschnittstelle geschaffen werden. Hierzu existieren eine Reihe von Ein- und Ausgabeelementen, die physikalischen Instrumenten nachempfunden sind. Dies sind z.B. Knöpfe und Schalter, Leuchten und Diagramme sowie Anzeigeelemente aller existierenden Datentypen. Der Programmierer hat dabei die Kontrolle, bestimmte Eingriffsmöglichkeiten des Anwenders zu sperren oder andere hervorzuheben, was eine gewisse Sicherheit des Programmablaufes gewährleisten kann. Hinzu kommt die Option, den VIs unterschiedliche Prioritäten zuzuordnen, bzw. eine Zykluszeit pro VI zu definieren, um so die Kontrolle über das kooperative Multithreading zu gewährleisten. Dies ist wichtig, da sich dadurch die Optimierung bezüglich Sicherheit und Geschwindigkeit des Programmablaufes abschätzen läßt. Die Kommunikation mit der verwendeten Meßkarte wird stark vereinfacht, da LabVIEW™ hierzu spezielle VIs anbietet, welche den Zugriff auf deren analoge und digitale Ports und Counter ermöglichen.

Den genannten Vorteilen dieser Entwicklungsumgebung stehen andererseits auch Nachteile gegenüber, wie z.B. die fehlende Möglichkeit der Einflußnahme des Entwicklers auf die Speicherverwaltung (LabVIEW™ organisiert dies eigenständig), erheblich größere Programmfiles oder etwa die geringere Geschwindigkeit im Vergleich mit höheren Programmiersprachen wie z.B. C.

LabVIEW™ unter Windows NT 4.0™ ist nicht echtzeitfähig. Echtzeitfähigkeit kann nur durch Programmierung zeitabhängiger bzw. zeitkritischer Prozesse direkt auf der Meßkarte, d.h. ohne ein Softwaremodul in einem geschlossenen Wirkungskreis, erreicht werden. Mit der zur Verfügung stehenden Meßkarte ist dies nur eingeschränkt möglich, wie wir sehen werden.

4.2 Multifunktionsmeßkarte PCI-6023E

Die PCI-6023E (National Instruments) ist eine PCI-Datenerfassungskarte. Sie bietet 16 analoge Eingangskanäle, welche wahlweise als 8 Eingänge für Differentialsignale genutzt werden können. Weiterhin stehen bis zu 32 digitale I/O-Kanäle zur Verfügung. Es existieren zwei 24-Bit-Counter. Sämtliche Signale sind über einen 68-Pin-SCSI-Stecker nach außen geführt.

Der DAQ-STC-Timingcontroller (s. Abb. 10) steuert sämtliche zeitabhängigen Prozesse, wie A/D-Umsetzung, gepufferte Erfassung und Generierung sowie Counterfunktionen.

Die Karte besitzt einen 12-Bit-Analog-Digital-Umsetzer (ADU; Sukzessive Approximation) mit einem Eingangsspannungsbereich von ± 5 V und einer maximalen (garantierten) Samplingfrequenz von 200 kHz. Ihm vorgeschaltet ist ein Verstärker, dessen Verstärkungsfaktor von 0,5 , 1,0 , 10 und 100 programmierbar ist, um den ADU optimal auszusteuern. In dem Verstärker kann ein Dithersignal (weißes Rauschen; Gaußverteilt) zum Eingangssignal addiert werden. Von eventuell mehreren gewählten analogen Eingängen schalten Multiplexer (MUX) jeweils einen pro Umsetzungsperiode zum ADU durch; deren Taktfrequenz ist also um ein Vielfaches größer als die des ADU. Diese kann bei verschiedenen

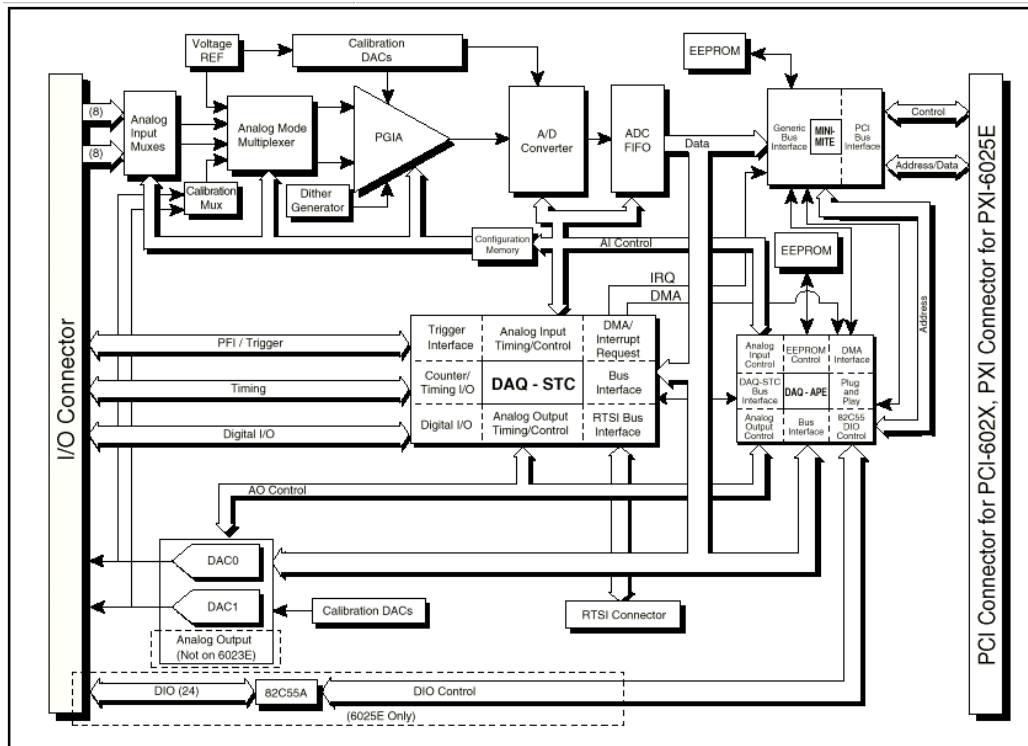


Abbildung 10 : PCI-6023E, Blockschaltbild [11]

Verstärkungseinstellungen einzelner Kanäle aufgrund von Settlingzeiten allerdings nicht voll ausgenutzt werden. Die umgesetzten Spannungswerte werden in einem FIFO-Register (**First-In-First-Out**) zwischengespeichert, bis sie durch den PCI-Controller (MITE) über den PCI-Bus transferiert werden.

Bei Verwendung beider Counter stehen noch maximal 8 Digitale I/O-Kanäle zur Verfügung. Die Counter sind digital triggerbar. Alle Timingsignale können über den RTSI-Bus zu andern Meßkarten geführt werden. Der DAQ-STC liefert eine maximale Taktfrequenz von 20 Mhz.

Für den Versuchsaufbau wird ein analoger Kanal zur Erfassung der Ausgangsspannung des US-Sensors verwendet. Über digitale Kanäle werden die Magnetventile gesteuert. Alternativ zu beiden kann auch ein getriggertes Countersignal genutzt werden; die entsprechende Methode wird in 9.2.2 erläutert.

4.3 Ultraschallsensor 301V

Der Ultraschallsensor 301V (Wegener Sensortechnik) liefert ein analoges Ausgangssignal von 0 – 10 V proportional zur Entfernung eines sich im Abstrahlbereich befindlichen Objektes. Die Reichweite beträgt 2000 mm. Es werden die Laufzeiten eines reflektierten gepulsten 40 kHz-Schallsignals ausgewertet. Die Ansprechzeit wird mit 20 ms angegeben. Der Sensor besitzt eine Linearität und eine Wiederholgenauigkeit von 0,1 %. Die Genauigkeit entspricht 0,5 % der Reichweite. Die minimale Entfernung des Sensors beträgt ca. 150 mm ! [12]

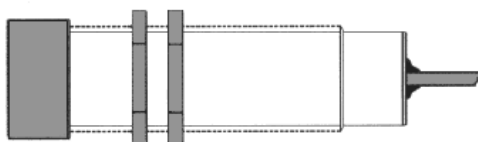


Abbildung 11 : Ultraschallsensor 301V

Durch den relativ großen Öffnungswinkel der Hauptkeule von ca. 20° eignet sich der Sensor gut für die Erfassung der Entfernung des Maxwellrades, da man eine gewisse Toleranz gegenüber einer Abweichung der Radbahnkurve von der Sensorachse erwarten kann.

4.4 C-Control

C-Control [2] ist ein Microcontrollersystem der Firma Conrad Electronic. Herzstück des Systems ist der Mikrocontroller MC68HC05B6 von MOTOROLA. Die „Main-Unit“ ist auf einer Platine von einem viertel Euroformat aufgebaut. Darauf befinden sich neben dem Mikrocontroller ein Pegelwandlerchip für die serielle Schnittstelle (RS232) und ein Speicherchip (24C65, 8 Kilobyte) zur Aufnahme des Anwenderprogramms und zur Aufzeichnung von Daten. Dieser ist in EEPROM-Technologie ausgeführt, wodurch alle Informationen, auch nach dem Abschalten der Betriebsspannung, erhalten bleiben. Der Anschluß eines DCF-Empfängers ist möglich. Weiter gibt es zwei Systemsteuertasten (Reset und Start) sowie drei Systemsignal-Leuchtdioden (LEDs). Diese signalisieren „DCF Zeit OK“, „Prozessor in Betrieb“ und „Übertragung von Daten über serielle Schnittstelle“ bzw. „Programmausführung“.

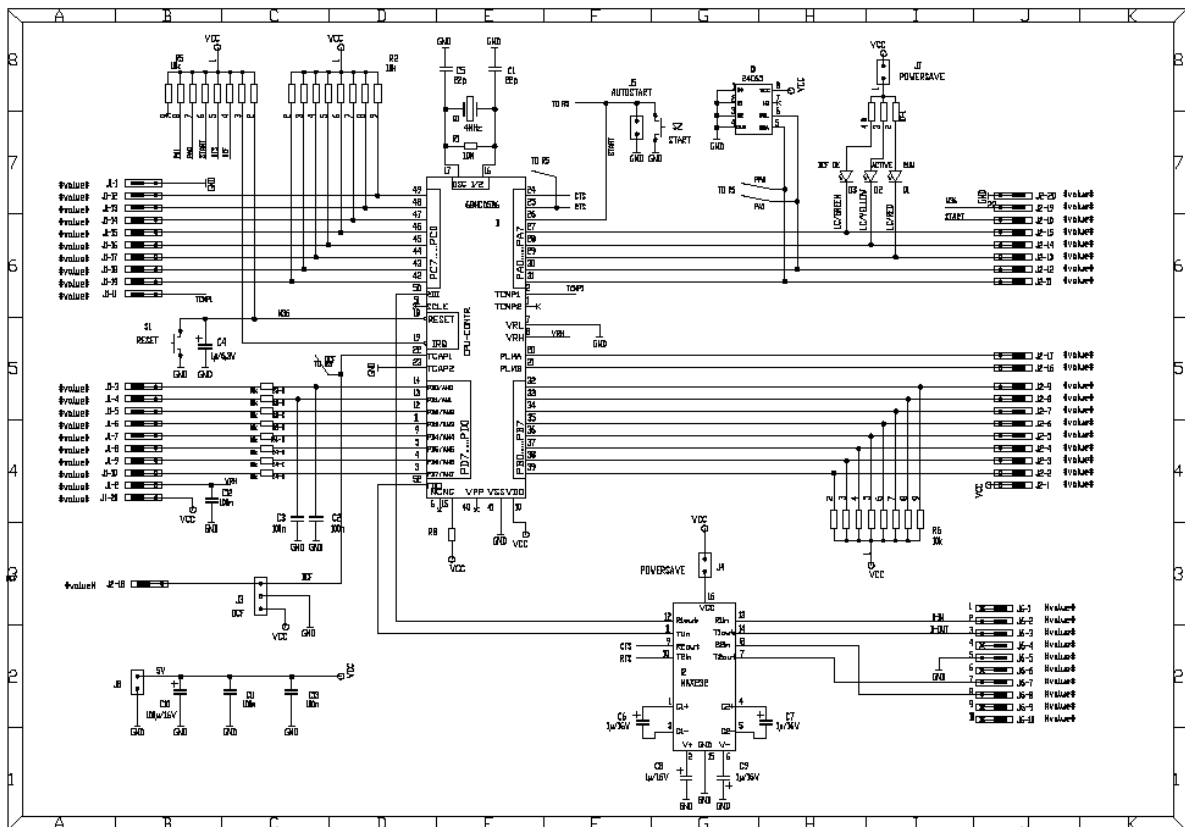


Abbildung 12 : C-Control Main-Unit, Schaltplan [2]

Alle Ein- und Ausgänge sowie einige Systemsignale sind an zwei Buchsenleisten zugänglich. Beim Aufstecken der C-Control Unit auf das Starterboard wird über diese Buchsenleisten die Verbindung zwischen den Platinen hergestellt (inkl. Betriebsspannungszuführung). Ferner sind drei Steckbrücken zur Systemkonfiguration vorhanden. Mit dem Jumper LED können die Systemstatus LEDs abgeschaltet werden, was eine Stromersparnis bedeutet. Über den Jumper 232 kann der Baustein für die Pegelwandlung der seriellen Schnittstelle abgeschaltet

werden, falls er nach der Programmierung und für den späteren Programmablauf nicht mehr benötigt wird. Dies ergibt ebenfalls eine Reduzierung der Stromaufnahme. Der Jumper AST ist parallel zum START Taster geschaltet. Ist der Jumper gesetzt, so beginnt der Programmablauf sofort nach Anlegen der Betriebsspannung.

Der Schaltplan der Main-Unit ist in Abb. 12 dargestellt. Den Takt liefert ein 4 Mhz-Quarz.

Der Microcontroller besitzt 16 digitale Ports, welche je als Ein- oder Ausgang (5V/10mA) programmierbar sind, 8 analoge Eingänge (ADU : sukzessive Approximation) und 2 analoge Ausgänge (pulsweiten-moduliert, PWM-Frequenz 1953 Hz), weiterhin einen DCF-77 Antenneneingang, sowie eine RS-232 Schnittstelle (1200 - 9600 Baud). Im Energiesparmodus wird ein Stromverbrauch <10 mA angegeben.

Programmiert wird der Microcontroller über die RS232-Schnittstelle und einen entsprechenden Compiler, welcher gleichzeitig als Terminal dient.

Das Starterboard enthält im wesentlichen einen Spannungsregler zum herstellen der stabilisierten 5V-Spannung, eine Referenzspannungsquelle auf Basis des LM317 und 2 Relais, welche jeweils über einen Treibertransistor von den digitalen Ausgängen 1 und 2 geschaltet werden.

Das C-Control-System wird in dieser Arbeit für die Steuerung des gesamten Prozesses genutzt. Über die digitalen Ausgänge werden die Magnetventile angesteuert; zur Erfassung des Ausgangssignals des US-Sensors wird ein analoger Eingang genutzt.

Im Gegensatz zum Einsatz der PCI-6023E ist der Versuchsaufbau auf Basis des Microcontrollers auch unabhängig von einem PC zu betreiben.

4.5 Dyneema SK 75

Die in dieser Arbeit verwendeten, unter den Handelsnamen Dyneema oder Spectra vertriebenen Fasern aus HPPE besitzen ein geringes Kriechverhalten, eine sehr hohe Zugfestigkeit ($250-300 \text{ kp/mm}^2$) und sind sehr dehnungsarm. Sie sind robuster als vergleichbare Aramidfasern und wesentlich leichter ($0,95-0,97 \text{ g/cm}^3$).

Bei der geflochtenen Leine SK 75 wurde die Zugfestigkeit gegenüber der des Vorgängers SK 65 um den Faktor 1,5 erhöht; sie ist zudem dünner und leichter. Allerdings ist sie empfindlicher gegenüber mechanischen Belastungen. [3] [4]

In dem Versuchsaufbau wird sie aufgrund ihrer sehr geringen Viskosität eingesetzt, um die Verluste des Maxwell'schen Rades insbesondere während des Stoßvorganges am unteren Umkehrpunkt zu minimieren.

4.6 3/2-Magnetventil

Das CPE10-M1H-3GL-QS6 Magnetventil aus der Compact-Performance-Reihe der Firma Festo AG ist ein 3/2-Wegeventil mit einem Nenndurchfluß von 370 l/min und Schaltzeiten von 18 ms (Ein) und 14 ms (Aus).

Es handelt sich dabei um ein elektrisch indirekt durch eine vorgesteuerte Spule betätigtes, monostabiles Ventil. Das Ventil behält nach Umschalten seine Schaltstellung nur solange bei, solange das Signal zum Umsteuern ansteht. Nach Abschalten von diesem Signal wird das Ventil durch eine pneumatische Feder zurückgestellt. [5]

Die elektrische Nennleistung von 1 W ist für eine Spannung von 24 V DC angegeben. Dies entspricht einem Strom von ca. 42 mA.

Das Magnetventil wird in dieser Arbeit eingesetzt, den pneumatischen Muskel alternierend mit Druck zu beaufschlagen und wieder zu entlüften. Es wurde aufgrund der Kombination geringer Abmessungen mit relativ schnellen Schaltzeiten und hohem Nenndurchfluß ausgewählt (s. Kap. 7).



Abbildung 13 : CPE10-M1H-3GL-QS6 3/2-Wegemagnetventil [5]

4.7 Der pneumatische Aktuator MAS10-N80-AA-MCFK

Der von der Firma Festo AG entwickelte „Fluidic Muscle“ MAS10-N80-AA-MCFK ist ein pneumatischer Aktuator. Er besteht aus einem Kontraktionsschlauch und zwei Verbindungselementen. Der Kontraktionsschlauch ist aufgebaut aus einem rautenförmigen Geflecht von Fasern sehr geringer Dehnbarkeit, welche spiralartig längs des Schlauchmantels verlaufen. In dieser Spiralbahn umläuft jede einzelne Faser den Schlauch über dessen Gesamtlänge. Die Fasern schneiden sich jeweils in einem bestimmten Winkel. Das Geflecht ist mit einem Gummimantel überzogen. Wird der Kontraktionsschlauch mit einem Druck beaufschlagt, so dehnt dieser sich in radialer Richtung aus. Der Schnittwinkel α der Fasern muß sich zwangsläufig vergrößern, da der Spiraldurchmesser wächst, die Faserlänge aber konstant bleibt. So verringert sich folglich die Ausdehnung des Aktuators in Längsrichtung. Der Muskel kontrahiert. Er ist somit ein reiner Zugaktuator.

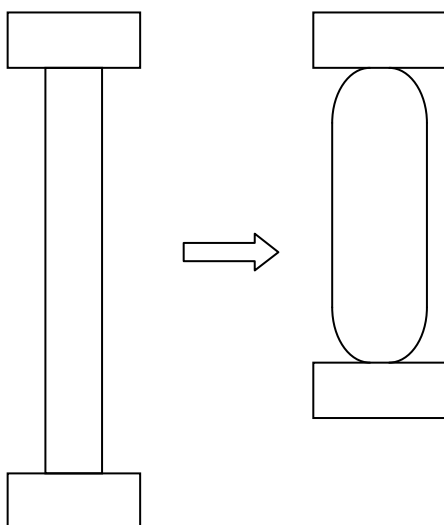


Abbildung 14 : Pneumatischer Muskel, Kontraktion

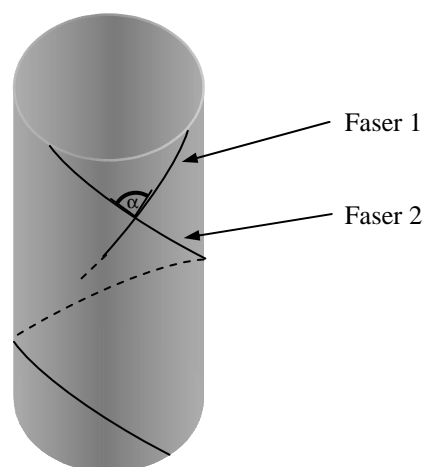


Abbildung 15a : McKibben-Muskel, Faserstruktur

Dieses unter dem Namen McKibben bekannte Funktionsprinzip wurde erstmalig in den 50er Jahren in der Entwicklung künstlicher Gliedmaßen erforscht und in den späten 80er Jahren von der Firma Bridgestone Japan für den Einsatz in Robotikkomponenten kommerzialisiert. [1]

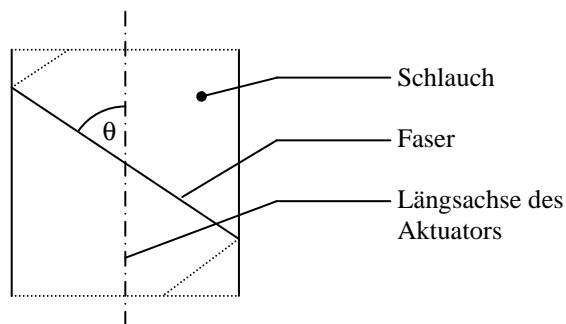


Abbildung 15b : McKibbenmuskel, Seitenansicht

Bezeichnet man den Schnittwinkel eines Faserstranges mit der Längsachse des Aktuators mit θ , die Gesamtlänge einer solchen Faser mit b und mit n die Anzahl der Faserwindungen, so läßt sich unter Einbezug der Differenz

$$P' = P_i - P_0 \quad \text{Gleichung 27}$$

von Innendruck und Umgebungsdruck eine Beziehung herleiten, welche die theoretische Spannung des ideal zylindrischen Aktuators mit verschwindender Manteldicke ohne viskose Verluste in Abhängigkeit von diesen Größen ausdrückt :

$$F(P', \theta, b, n) = \frac{P' b^2}{4\pi n^2} (3 \cos \theta - 1) \quad \text{Gleichung 28}$$

Die Kraft eines solchen Aktuators ist also direkt proportional zur Druckdifferenz und eine monotone Funktion des Schnittwinkels für $0^\circ < \theta < 90^\circ$. [9]

Für reale Aktuatorformen, welche von dem idealen Zylinder abweichen, ist es opportun, die Volumenänderung in Abhängigkeit von der Längenänderung des Aktuators unter Verwendung der Beziehung

$$F = -P' \frac{dV}{dL} \quad \text{Gleichung 29}$$

zu betrachten und entsprechend analytisch oder experimentell auszuwerten. [1]

5 Untersuchung eines Ultraschallsensors

5.1 Ziel des Versuchs

Es soll die Kennlinie des Ultraschallentfernungssensors 301V ermittelt werden, um so eine kontinuierliche Zuordnung von Entfernungswerten zur Ausgangsspannung des Sensors vornehmen zu können.

5.2 Vorgehensweise

An einem Stativ variabel in seiner Höhe befestigt wird der Sensor vertikal ausgerichtet, so daß seine Hauptkeule senkrecht auf eine ebene auf dem Boden liegende Aluminiumplatte trifft. Die Ausrichtung wird durch Peilen auf entsprechend vertikale Raumgeometrien vorgenommen. Es werden für verschiedene Abstandswerte die entsprechenden Werte der Sensorausgangsspannung aufgenommen. Hierbei werden in einem Zeitintervall von fünf Sekunden 2000 Werte gemessen und gemittelt.

Gemessen wird die Spannung mit Hilfe der Meßkarte und eines entsprechenden LabVIEW™-VIs. Die Höhe wird mittels eines Zollstocks ermittelt.

5.3 Meßergebnis

Die Meßwerte sind in Abb. 14 dargestellt. Es ergibt sich ein näherungsweise linearer Verlauf der Kennlinie (s. Abb. 15).

x [m]	U _a [V]
0,2000	1,163
0,3000	1,703
0,3910	2,188
0,4825	2,676
0,5700	3,120
0,6680	3,620
0,7870	4,214
0,8910	4,748
1,0030	5,322
1,1155	5,909
1,2430	6,548
1,3590	7,143
1,4545	7,632
1,5530	8,119
1,6340	8,539

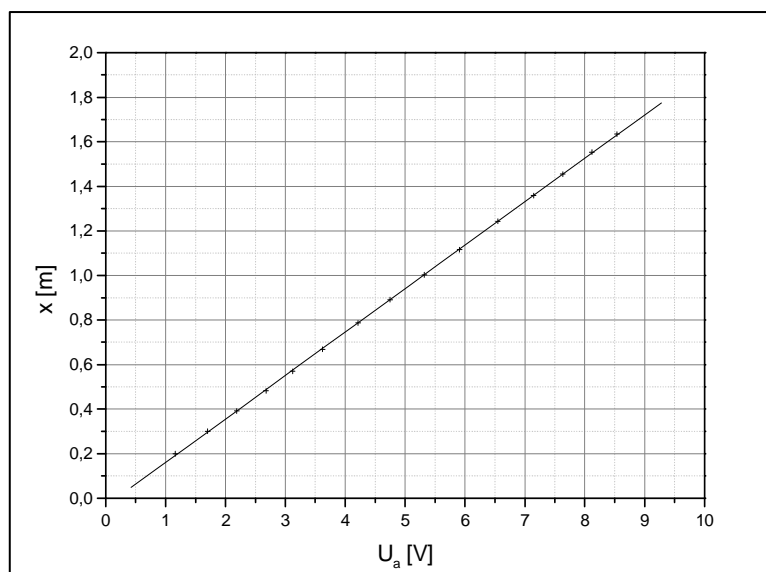


Abbildung 14 : Meßwerte,US-Sensor Abbildung 15 : Kennlinie,Ultraschallsensor

5.4 Auswertung

Der Graph in Abb. 15 zeigt einen nahezu linearen Verlauf der Kennlinie. Eine lineare Regression führt auf die Kennliniengleichung

$$x(U) = 0,19521 \frac{m}{V} \cdot U - 0,0353 m$$

Gleichung 30

Die Standardabweichung ist mit 0,00338 sehr gering. Der gemessene Verlauf der Kennlinie wird also durch die Regressionsgerade sehr gut angenähert.

Die ermittelte Kennliniengleichung (Gl. 30) wird daher für die Erfassung und Verarbeitung der Höhe des Maxwellrades zugrunde gelegt.

6 Konzeption des Versuchsaufbaus (Mechanik)

6.1 Anforderungskatalog

Nr.	Anforderung	Gewichtung
1	Justierbarkeit der Aufhängung (Lage der Bahnkurve über US-Sensor)	+++
2	Stabilisierung der Bahnkurve	+++
3	Stabilisierung des Antriebselementes	++
4	mechanische Robustheit gegenüber äußeren Einwirkungen	++
5	Autonome Betriebsmöglichkeit	++
6	niedrige Materialkosten	++
7	niedrige Fertigungskosten	+++
8	Einfache Handhabung	+
9	Minimierung der dissipativen Kräfte	++
10	optische Attraktivität	++

Abbildung 16 : Anforderungskatalog, mechanischer Versuchsaufbau

Die wesentlichen Anforderungen an die mechanische Seite des Versuchsaufbaus, bestehend aus Aufhängungen für Sensor und Antriebselement (Aktuator), Stabilisierungs-, Führungs- und Justageelementen sowie letztlich dem Maxwellrad selbst, sind in Abb. 16 aufgeführt.

Der Schwerpunkt der Anforderungen wurde auf eine optimale Justiermöglichkeit der Aufhängungen gelegt, um eine fluchtende Anordnung von Sensorachse und Bahnkurve des Maxwellrades sicherzustellen. Ebenfalls sehr wichtig für die Gesamtfunktion der Apparatur ist eine möglichst stabile Bahnkurve, um den unbeaufsichtigten Betrieb zu gewährleisten. Weiterhin wurde auf minimale Fertigungskosten Wert gelegt; es sind nach Möglichkeit sämtliche Komponenten im Hause zu fertigen.

Eine Stabilisierung des Antriebselementes oder der kraftzuführenden Einrichtungen ist insofern wichtig, als die Bahnkurve des Maxwellrades beim Anzug des pneumatischen Muskels nicht durch seitlich wirkenden Kraftanteile gestört werden sollte. Wünschenswert wäre eine axiale Ausrichtung von Bahnkurve und Kraftvektor des Antriebselementes.

In Bezug auf Justage und Stabilität war ein robuster Aufbau geplant, um keine Veränderungen über die Zeit oder durch kleinere äußere Störungen wie Stöße oder Schwingungen zu erfahren.

Um die durch den Antrieb zur Verfügung gestellte Energie optimal auszunutzen, war zu versuchen, die zusätzlich zum Stoß am Umkehrpunkt auftretenden Verluste zu minimieren, so daß eine möglichst hohe Position des oberen Umkehrpunktes gehalten werden kann.

Unter autonomer Betriebsmöglichkeit ist zu verstehen, daß keine zusätzlichen mechanischen Einrichtungen außer einer Aufstellungsebene benötigt werden.

Letztlich runden niedrige Materialkosten und eine leicht erlernbare Aufstellung und Einrichtung der Apparatur das Anforderungsprofil ab.

6.2 Version 1.0

6.2.1 Konzept

Für die Grundvoraussetzungen Stabilität, Robustheit und autonomer Betrieb wurde ein alleinstehender stativähnlicher Aufbau auf einer Grundplatte vorgesehen. Er basiert auf zwei senkrecht im Abstand von ca. 120 mm auf der Grundplatte befestigten Stäben, welche durch zwei quer liegende Aufhängplattformen für US-Sensor und pneumatischen Muskel verbunden sind.

Für die Stabilität der Antriebsachse wurde ein Hohlzylinder als Führungselement vorgesehen, welcher den pneumatischen Muskel aufnimmt und kolbengleich führt. Eine Minimierung der Verluste wird durch Schmieren oder Ölen der Kontaktbereiche von Muskel und Führungszylinder erreicht.

Die Justiermöglichkeit wird durch Lösen der Verbindungsstellen zwischen Stäben und Aufhängplattformen, Ausrichten derselben und anschließendes fixieren gegeben.

Zum Erreichen der Stabilität der Bahnkurve wurde angenommen, daß ein möglichst großes Verhältnis von Durchmesser zu Dicke der Maxwell'schen Scheibe ausschlaggebend ist, um so den Effekt der Stabilität der Kreiselachse auszunutzen.

Um die Kosten niedrig zu halten, sollten soweit möglich Normteile verwendet werden. Die Hauptursache der auftretenden Verluste wurde der Viskosität von kraftübertragenden Elementen zugeschrieben. Für Stativ und Aufhängungen finden daher metallische Werkstoffe, in erster Linie Stahl und für Elemente geringeren Gewichts Aluminium, Anwendung. Als Fadenmaterial war solches geringer Viskosität und hoher Zugfestigkeit vorzusehen.

Der prinzipielle Aufbau dieser Apparatur ist in Abb. 17 skizziert.

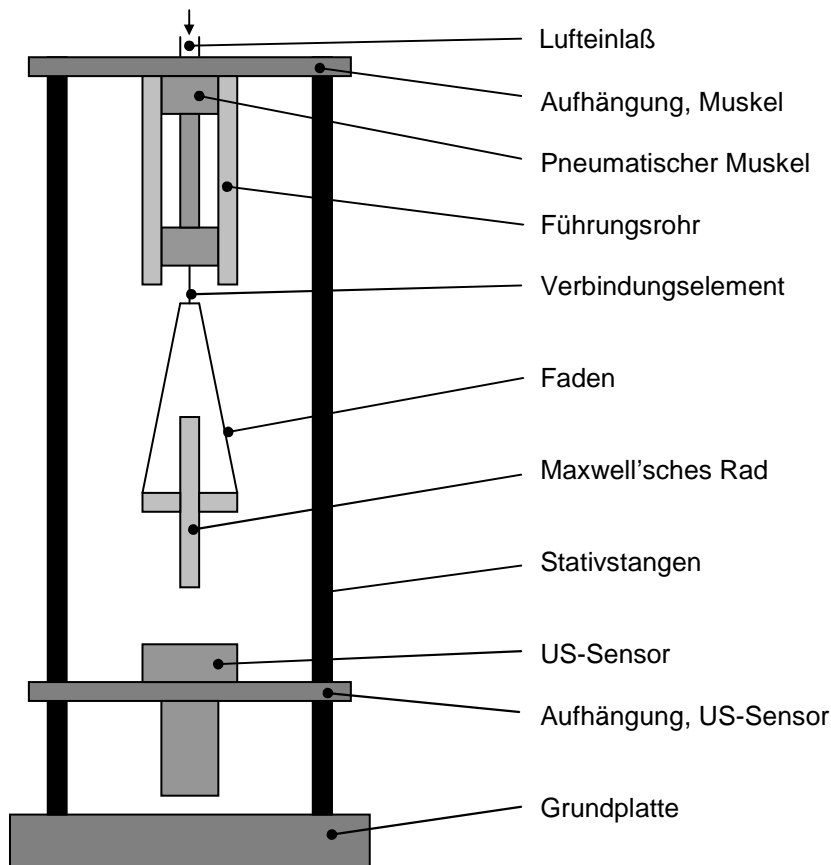


Abbildung 17 : mechanischer Versuchsaufbau, Konzept 1.0

6.2.2 Realisierung

Der erste Prototyp des mechanischen Versuchsaufbaus wurde aus dem Konzept in 6.2.1 entwickelt. An einer 20 mm dicken Stahlgrundplatte mit zwei Innengewinden (M12) wurden zwei Gewindestangen (M12 x 1000 mm, Normteile) befestigt. Ausgehend von vorhandenem Halbzeug wurden zwei Drehteile aus Aluminium (d = 125 mm) für die beiden Aufhängplattformen gefertigt. Sie enthalten eine konzentrische Bohrung (30 mm, Sensorplattform; 16 mm, Antriebsplattform).

Als Führungsrohr (40 x 30 x 150 mm) wurde entsprechendes PMMA-Halbzeug verwendet und durch eine Klebeverbindung auf einer M16-Unterlegscheibe befestigt, um zusammen mit dem pneumatischen Muskel mit der oberen Aufhängplattform verschraubt zu werden.

Als Fasermaterial für den Faden kam Dyneema SK 75 (0,16 mm) zum Einsatz, welches durch seine enorm hohe Zugfestigkeit und sehr niedrige Dehnbarkeit für diesen Einsatz prädestiniert war.

Das Maxwellrad selbst besteht aus einer 10 x 6 mm Aluminiumscheibe und einer durchgehenden 77 x 4 mm Stahlwelle. Als Befestigungsmöglichkeit für den Dyneemafaden wurden zwei Durchgangsbohrungen (1 mm) angebracht, in welchen der Faden laut Abb. 18 befestigt werden kann.

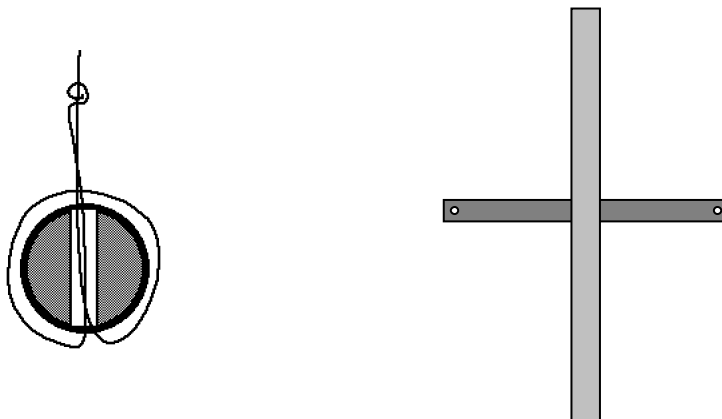


Abbildung 18 : Maxwell'sches Rad, Fadenbefestigung [8]

Um eine stabile und robuste Verbindung der Gewindestangen mit Grundplatte und Aufhängplattformen sicherzustellen, wurden Sprengringe in die Verschraubung nach Abb.19 eingefügt.

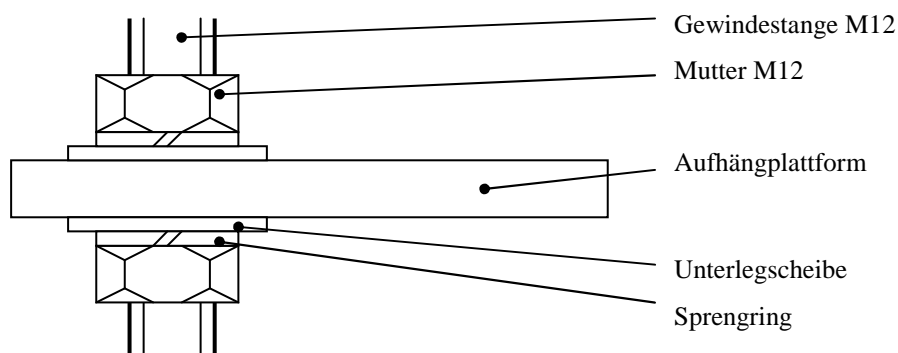


Abbildung 19 : Schraubverbindung

Die Verbindung des Dyneemafadens mit dem Muskel wurde über eine Lose Rolle und eine Klemmverbindung hergestellt (s. Abb. 20).

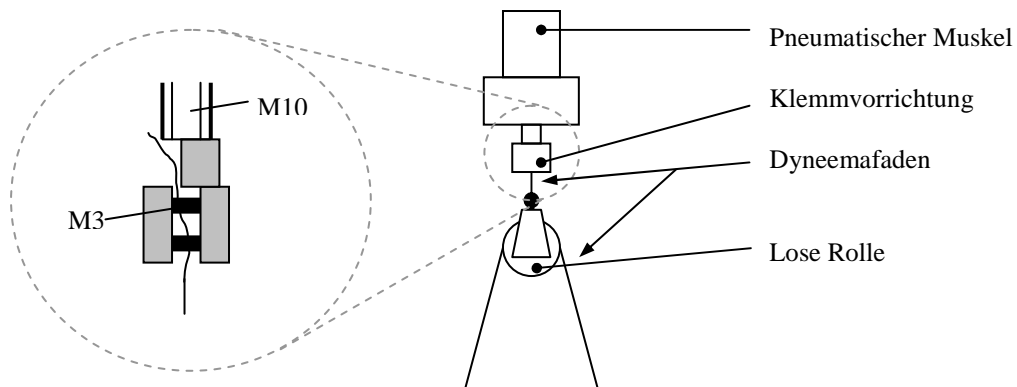


Abbildung 20 : Klemmvorrichtung

Eine Skizze des realisierten Versuchsaufbaus zeigt Abb. 21.

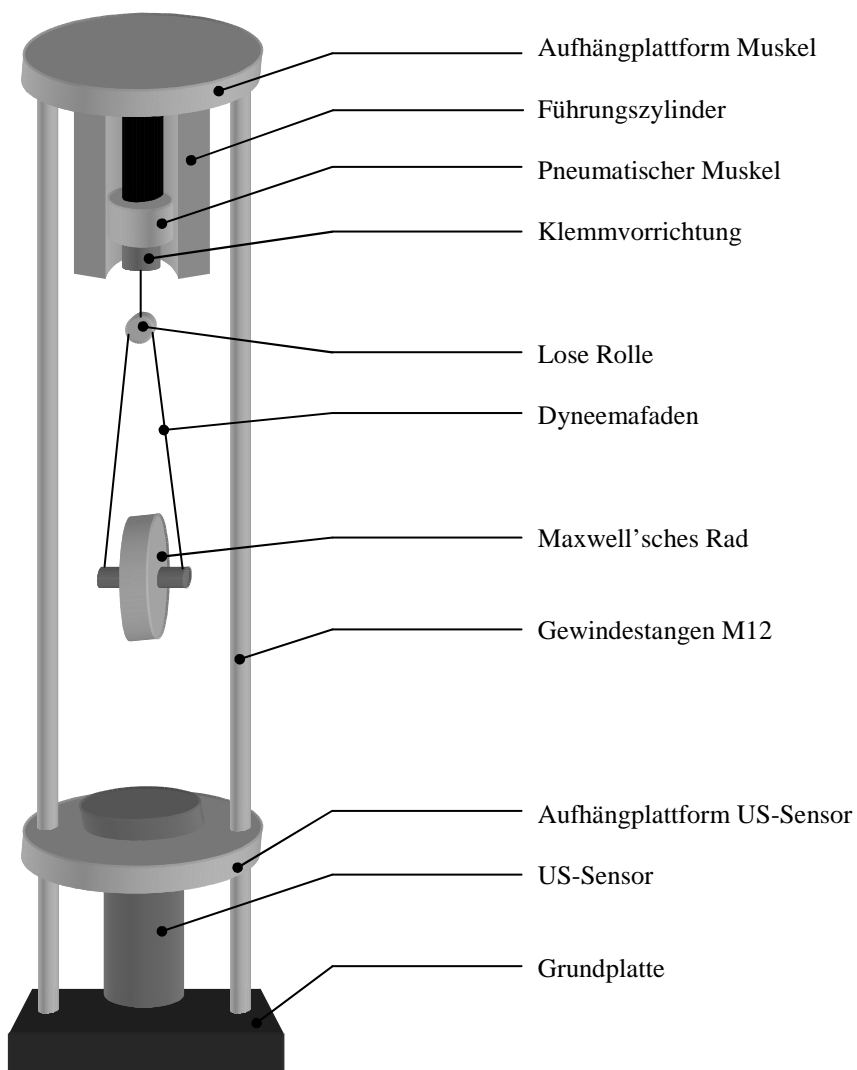


Abbildung 21 : mechanischer Versuchsaufbau, Realisierung 1.0

6.2.3 Bewertung

Die ausgehend von Konzept 1.0 gefertigte Version des mechanischen Versuchsaufbaus wies einige grundlegende Mängel auf, welche eine zufriedenstellende Funktion verhinderten. Das Ergebnis einer Fehleranalyse ist Abb. 22 zu entnehmen.

Fehler / Mangel	Gründe	Ursachen
Bahnkurve instabil	Radachse (Kreiselachse) instabil	Auswuchtung unzureichend
		Bohrungen nicht fluchtend
		Trägheitsmoment nicht ausreichend
		Störmoment durch Stoß
		Verbindungselemente unzureichend
Rotation um Bahnachse	Präzession / Störmoment	Störkraft durch Antriebselement
		Stabilisierung der Antriebsachse unzureichend
		Bohrungen nicht fluchtend
Anaxialität Sensor/Bahnkurve	Justage schlecht	Steifigkeit des Stativs unzureichend
		unsymmetrische Radaufhängung
		Justage schwer handhabbar

Abbildung 22 : Fehlerursachenanalyse. Versuchsaufbau 1.0

Der schwerwiegendste Fehler war die deutliche Instabilität der Bahnkurve des Maxwellrades. Nach dem ersten Stoß am Umkehrpunkt war ein starkes Schwingen zu erkennen, welches sich mit der Anzahl der Stöße aufzuschaukeln schien. Begleitend war ein Taumeln des Rades, bzw. eine Rotation um die Bahnachse zu bemerken. Die Folgen dieser beiden Mängel sind einerseits das Herauswandern des Rades aus der Hauptkeule des US-Sensors und Kollisionen mit den Gewindestangen des Versuchsaufbaus. Aus diesem Grunde war der Versuchsaufbau 1.0 praktisch nicht einsetzbar, da die grundlegende Anforderung der Stabilität der Bahnachse nicht erfüllt wurde.

Die Ursachen für diese Instabilität sind vielschichtig. Zum einen kommen fertigungstechnische Ungenauigkeiten, wie schlechte Auswuchtung und Bohrungspositionierung (Parallelität; Schneiden der Radachse) zum Tragen. Zusätzlich wurde für die Stabilität der Kreiselachse (Radachse) das Trägheitsmoment zu niedrig ausgelegt. Das Störmoment am unteren Umkehrpunkt ist durch die Physik des Abrollvorgangs selbst zu erklären. Die mangelnde Robustheit der Stativelemente trägt ihren Teil bei. Letztlich existiert noch eine anaxiale Kraftkomponente des Antriebs durch unzureichende Führung der Antriebsachse.

Die beobachtete Rotation des Rades um seine Hochachse wird im wesentlichen beim Stoß durch die nicht parallelen Bohrungen verursacht; weiterhin muß auch eine nicht exakt symmetrische Aufhängung des Rades in Betracht gezogen werden, was eine Winkelabweichung der Hochachse des Rades von der Senkrechten und so eine Präzession durch das entstehende Störmoment beim Stoß zur Folge hätte. Denkbar wäre auch eine fehlende Koaxialität von Rad und Radachse.

Die in 6.2.1 angedachte Justagemöglichkeit erwies sich in der Praxis als nicht handhabbar. Es war praktisch nicht möglich, eine eingestellte Ausrichtung, d.h. die Axialität von Hauptkeule des US-Sensors, Bahnkurve des Maxwellrades und

Aktuatorachse, auch während des Fixierens der Schraubverbindungen beizubehalten.

Abschließend muß noch erwähnt werden, daß die geringe Abrieb- und Knickfestigkeit des verwendeten Fasermaterials Dyneema offenbar nach wenigen Bahnperioden zu einem Versagen der bifilaren Radaufhängung führte. Die Faser-Rad-Verbindung war in der geplanten Ausführung (s. Abb. 18) also nicht zu gebrauchen.

Nr.	Funktion	Bewertung
1	Justierbarkeit der Aufhängung (Lage der Bahnkurve über US-Sensor)	--
2	Stabilisierung der Bahnkurve	---
3	Stabilisierung des Antriebselementes	-
4	Robustheit	--
5	Autonome Betriebsmöglichkeit	++
6	niedrige Materialkosten	+++
7	niedrige Fertigungskosten	+++
8	Einfache Handhabung	--
9	Minimierung der dissipativen Kräfte	o
10	optische Attraktivität	+

Abbildung 23 : Bewertung, mechanischer Versuchsaufbau 1.0

6.3 Version 1.1

6.3.1 Konzept

Die aus der Bewertung in 6.2.3 gewonnenen Erkenntnisse sollen nun dazu dienen, Verbesserungen an dem mechanischen Versuchsaufbau zu konzipieren, um den Anforderungskatalog in 6.1 Abb. 16 zu erfüllen.

An erster Stelle steht die Verbesserung der Stabilität der Bahnkurve. Hierfür wird ein Maxwellrad mit erheblich höherem Trägheitsmoment bezogen auf die Rotationsachse vorgeschlagen, um die Stabilität der Kreiselachse zu erhöhen. Dies soll im wesentlichen durch einen größeren Raddurchmesser und einen Werkstoff höherer Dichte erreicht werden.

Die energiezuführenden Elemente sollen durch ein weiteres Führungselement in ihrer Ausrichtung unterstützt werden. So sollen seitlich angreifende Störkräfte durch das Antriebselement weiter reduziert werden.

Die Robustheit, welche ebenfalls einen entscheidenden Einfluß auf die Bahnstabilität ausübt, soll durch Spannvorrichtungen erhöht werden. Diese sollen justierbar ausgeführt werden, so daß die Lage der oberen Aufhängplattform in einer horizontalen Ebene veränderlich ist, um die Axialität von Antrieb, Bahnkurve und Sensor herzustellen. Auf diese Weise soll eine einfache Justagemöglichkeit erreicht und die Handhabung verbessert werden.

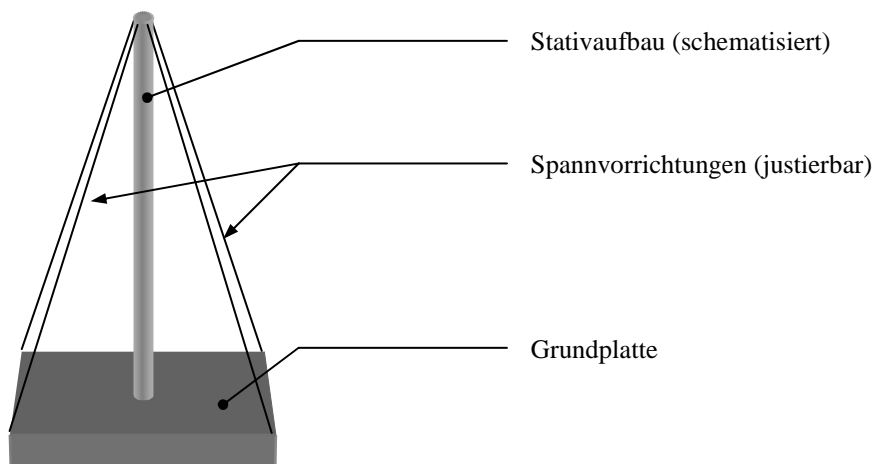


Abbildung 24 : Spannvorrichtungen, Grundprinzip

Zur Verbesserung der Robustheit des Fasermaterials Dyneema wird eine Verstärkung der Faser-Maxwellrad-Verbindung in der Weise geplant, als die Faser im Bereich der Verbindungsstelle mit einer Schutzschicht aus Kunstharz o.ä. überzogen bzw. getränkt werden soll, um die Lebensdauer der bifilaren Aufhängung zu verlängern.

6.3.2 Realisierung

Die Spannvorrichtung wurde aus zwei 3 mm Drahtseilen erstellt, welche mittig mit Hilfe von Seilklemmen an der oberen Aufhängplattform befestigt wurden. Hierbei war zu beachten, die Seilklemmen möglichst nahe dem Mittelpunkt der Plattform anzubringen, wie in Abb. 25 gezeigt. Auf diese Weise kann erst eine Justage durch Spannungsänderung der einzelnen Seile in zwei Raumrichtungen erfolgen.

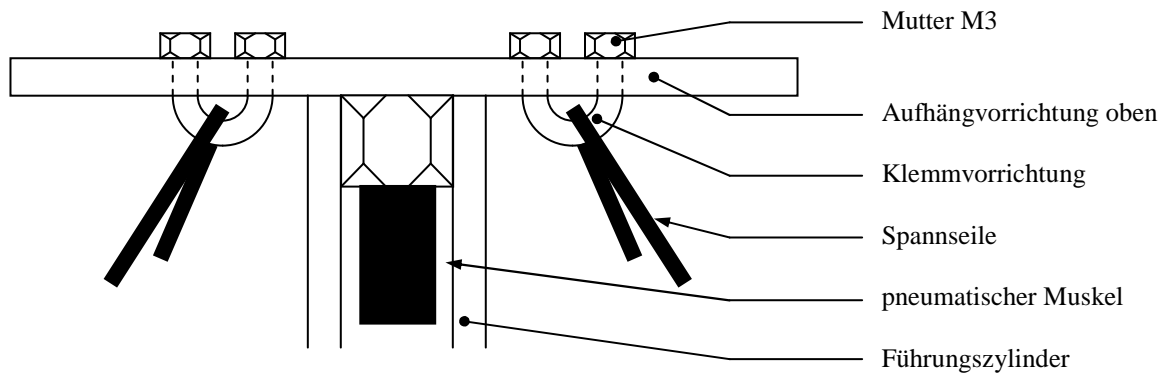


Abbildung 25 : Spannvorrichtung, Befestigung obere Aufhängplattform

Die Seilenden wurden an jeweils an einem Seilspanner befestigt, welche die Verbindung zur Grundplatte darstellen. Zu Bemerkem ist hierfür, daß die erreichbare Stabilität der Gesamtkonstruktion erhöht wird, je weiter die Seilspanner voneinander entfernt an der Grundplatte angebracht werden und je größer deren Entfernung zu der Hochachse des Versuchsaufbaus ist.

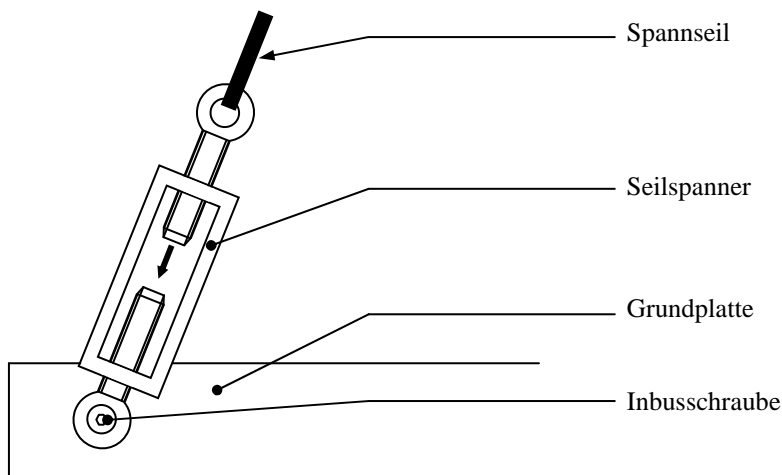


Abbildung 26 : Spannvorrichtung, Befestigung Grundplatte

Für die zweite Version des Maxwellrades wurde Messing gewählt, da dessen Dichte höher als die von Aluminium und Stahl ist. Um das Trägheitsmoment zu vergrößern, wurde der Durchmesser des Rades auf ca. 120 mm erhöht. Dies machte unter Berücksichtigung der Fertigungstechnik eine Vergrößerung des Achsdurchmessers notwendig. Um eine möglichst gute Rotationssymmetrie des Rades zu erhalten, muß dieses, nachdem die Achse eingefügt wurde, in seiner Gesamtheit auf der Drehbank

übergeschichtet werden. Ein einigermaßen taumelfreies Drehen war nur zu erreichen, indem eine Achsgeometrie von 5 x 70 mm gewählt wurde.

Die Verbindung von pneumatischem Muskel mit der losen Rolle wurde über einen Dyneemafaden hergestellt (s. Abb. 20). Um die Axialität der Antriebskraft zu verbessern, wurde ein weiteres Führungselement in Form eines PMMA-Prismenteils eingefügt, welches zwei 12 mm Bohrungen für die Verbindung zu den Gewindestangen besitzt und eine 0,5 mm Bohrung für die Seilführung (s. Abb. 27).

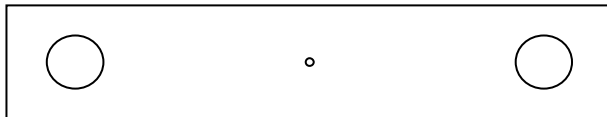


Abbildung 27 : Seilführung, PMMA

Die Verbindung des Dyneemafadens mit der Achse des Maxwellrades wurde in der Weise verstärkt, daß der Faden in das Verbindungsloch einlaminiert wurde. Dazu wurde die Bohrung mit Epoxyharz gefüllt und der Faden auf einer Länge von etwa 10 mm ausgehend von der Bohrung mit Harz getränkt (s. Abb. 28).

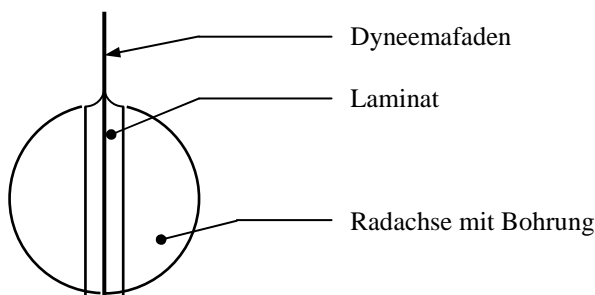


Abbildung 28 : Einlamminieren des Dyneemafadens

6.3.3 Bewertung

Die Version 1.1 des mechanischen Versuchsaufbaus zeigte einige funktionale Verbesserungen, so daß einige Punkte des Anforderungskataloges erfüllt werden konnten.

Die fertiggestellte Spannkonstruktion trug wesentlich zu einer Stabilisierung des Gesamtaufbaus bei, so daß auch bei größerer Fremdeinwirkung auf den Aufbau, sowie auch beim Stoß des Rades am Umkehrpunkt keine Verschiebung der einzelnen Stativelemente zu bemerken war.

Dadurch bedingt ist auch eine bessere Fixierung einer einmal vorgenommenen Justageeinstellung des Gesamtaufbaus. Diese lies sich durch wechselweises Betätigen der vier Seilspanner sehr einfach vornehmen, nachdem eine gewisse Grundspannkraft für die Stabilisierung eingestellt worden war.

Die zweite Ausführung des Maxwellrades wies eine erheblich bessere Auswuchtung auf. Auch reagierte dieses auf Störmomente erheblich träger als sein leichter Bruder. Dennoch war beim Erreichen des unteren Umkehrpunktes wiederum ein Störmoment zu bemerken, welches eine Rotationsbewegung zur Folge hatte. Diese

mag von den beiden nicht exakt äquidistanten Teilen der bifilaren Aufhängung herrühren. Ein größerer Einfluß ist allerdings einem minimalen Versatz beider Achsbohrungen zuzuschreiben, durch welchen wiederum ein Störmoment entsteht. Weiterhin existierte eine meßbare Differenz der Radien beider Achshälften von ca. 0,05 mm. Von Seiten der Fertigung war unter vertretbarem Aufwand allerdings keine Verbesserung mehr zu erwarten, so daß diese Version des Rades zugleich die Endversion darstellt und die Störeffekte durch andere Maßnahmen zu verbessern sind.

Zu erwähnen ist auch eine beobachtete Störung, welche durch das Grundprinzip des Maxwell'schen Rades selbst ihre Entstehungsursache findet. Am Umkehrpunkt, wo die Fäden vollends abgewickelt sind, erfährt dieses ein Störmoment, das durch den exzentrisch angebrachten Dyneemafaden, wie in Abb. 9 zu erkennen, entsteht. Das Störmoment bewirkt eine Pendelbewegung, welche sich von Bahnperiode zu Bahnperiode verstärkt und dazu führt, daß das Rad teilweise aus dem Erfassungsbereich des US-Sensors heraustritt.

Die immer noch instabile Bahnkurve bringt es mit sich, daß durch die zusätzliche Führung des Dyneemaseiles am Antriebselement kein verbessernder Einfluß auf das Verhalten der energiezuführenden Elemente zu erkennen war.

Die autonome Betriebsmöglichkeit wurde durch die vorgenommenen Veränderungen dahingehend verbessert, daß keine externen Hilfsmittel zur Fixierung oder Stabilisierung des Stativaufbaus selbst mehr benötigt werden und diese nun für den „stand alone“-Betrieb geeignet ist.

Nr.	Funktion	Bewertung
1	Justierbarkeit der Aufhängung (Lage der Bahnkurve über US-Sensor)	+++
2	Stabilisierung der Bahnkurve	--
3	Stabilisierung des Antriebselementes	-
4	Robustheit	+++
5	Autonome Betriebsmöglichkeit	+++
6	niedrige Materialkosten	+++
7	niedrige Fertigungskosten	+++
8	Einfache Handhabung	++
9	Minimierung der dissipativen Kräfte	0
10	optische Attraktivität	++

Abbildung 29 : Bewertung, mechanischer Versuchsaufbau 1.1

6.4 Version 1.2

6.4.1 Konzept

Die nach Modifikation von Version 1.0 immer noch vorhandene instabile Bahnkurve und Kreiselachse des Maxwell'schen Rades in Version 1.1 des mechanischen Versuchsaufbaus macht zusätzliche Maßnahmen erforderlich.

Die Hauptursache der Instabilität stellen die relativ hohen fertigungstechnischen Toleranzen dar. Wenngleich auch die Auswuchtung des Rades eine hohe Qualität aufwies, konnte jedoch die Achsgeometrie nicht zufriedenstellend gefertigt werden. Desweiteren weist auch die Rauhtiefe der Oberfläche einen sehr großen Wert auf. Da von Seiten der Fertigung keine Verbesserungen mehr zu erwarten waren, schien die einzige noch verbleibende Möglichkeit einer Stabilisierung des Prozesses in dem Einführen von weiteren Führungselementen zu existieren. Diese Führungselemente haben die Aufgabe, eine Gegenkraft aufzubringen, die jeweils ausreichend groß ist, um einer auftretende Störkraft entgegenzuwirken. Hierfür eignen sich prinzipiell Führungsstangen oder Führungsseile, welche längs der Bahn des Maxwellrades über die gesamte Länge der Bahnkurve verlaufen. Aufgrund des geringeren Fertigungsaufwandes und unter Berücksichtigung der Materialkosten wird der Einsatz von Führungsseilen geplant.

Die dabei entstehenden zusätzlichen Energieverluste durch Haft- und Gleitreibung an den Führungsseilen müssen damit in Kauf genommen werden. Ist die maximal erzeugbare kinetische Energie des pneumatischen Aktuators dennoch ausreichend, den oberen Umkehrpunkt des Rades stabil auf einer vertretbaren Höhe zu halten, so ist das Auftreten dieser zusätzlichen dissipativen Kräfte akzeptabel.

6.4.2 Realisierung

Als Material für die Führungsseile wurde aufgrund seiner hohen Zugfestigkeit wiederum Dyneema SK 75 eingesetzt. Durch die möglichen hohen Spannkraften wird die Federkonstante des gespannten Seils quer zur Bahnkurve ebenfalls sehr groß und verhindert so größere Rotationswinkel des Rades um die Bahnachse.

Die Spannvorrichtung wurde in Form zweier Aufhängplattformen aus Aluminium entwickelt, welche durch Schraubverbindung an den M12 Gewindestangen befestigt werden. Durch Drehen der Befestigungsmuttern kann die Spannung der Führungsseile variiert werden. Die Aufhängplattformen besitzen eine zentrische 30 mm Bohrung für die Durchtrittsmöglichkeit der Schallwellen des US-Sensors sowie des Antriebselementes.

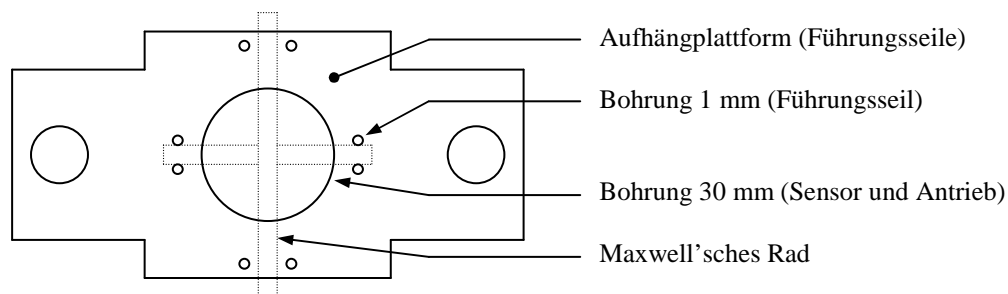


Abbildung 30 : Aufhängplattform, Führungsseile

Der Dyneemafaden wird durch jeweils acht zur Verfügung stehende 1 mm Bohrungen in der Plattform geführt, welche entsprechende Positionen besitzen, um den Faden längs des Rades und der Achse zu führen. Diese Aufhängplattform ist in Abb. 30 dargestellt.

6.4.3 Bewertung

Die Modifikation von Version 1.1 des mechanischen Versuchsaufbaus durch Hinzufügen von spannenden Führungsseilen führte letztlich zu Version 1.2, einer lauffähigen Version des mechanischen Versuchsaufbaus, welche zugleich die Endversion darstellt. Die Entwicklung des mechanischen Teils ist somit abgeschlossen.

Die Führung durch den Dyneemafaden stabilisierte die Bahn des Rades hinreichend, so daß es nun nicht mehr aus dem Erfassungsbereich des US-Sensors entwand. Das dennoch beobachtete Schwingen des Rades nach Auftreffen am Umkehrpunkt muß in Kauf genommen werden, beeinträchtigt es doch die Grundfunktion des Aufbaus nicht.

Nach Fertigstellen der steuerungstechnischen Komponenten wird sich später zeigen, daß die durch das Einführen der Führungsseile höheren Energieverluste des Maxwellrades gering genug sind, so daß die Maximalenergie des pneumatischen Aktuators ausreichend ist, die Höhe des oberen Umkehrpunktes stabil zu halten, wenn auch nicht wesentlich zu steigern.

Zusätzlich trug diese Modifikation zu einer weiteren Erhöhung der Robustheit des Gesamtaufbaus bei.

Die Laminierung der Dyneema-Rad-Verbindung erfüllte ihre Funktion derart gut, daß auch nach einem quasikontinuierlichen Betrieb der Anlage über einen Zeitraum von ca. 24 h keine Abnutzungserscheinungen mit bloßem Auge zu erkennen waren.

Von Seiten der Mechanik kann das Demonstrationsobjekt so letztlich über einen längeren Zeitraum unbeaufsichtigt autonom betrieben werden, wenngleich auch nicht alle Anforderungen nach 6.1 erfüllt werden konnten.

Nr.	Funktion	Bewertung
1	Justierbarkeit der Aufhängung (Lage der Bahnkurve über US-Sensor)	+++
2	Stabilisierung der Bahnkurve	++
3	Stabilisierung des Antriebselementes	++
4	Robustheit	+++
5	Autonome Betriebsmöglichkeit	+++
6	niedrige Materialkosten	+++
7	niedrige Fertigungskosten	+++
8	Einfache Handhabung	++
9	Minimierung der dissipativen Kräfte	+
10	optische Attraktivität	++

Abbildung 31 : Bewertung, mechanischer Versuchsaufbau 1.2

6.5 Zusammenfassung

Die Entwicklung der mechanischen Komponenten des Versuchsaufbaus, nämlich der Stativkomponenten, Führungselemente und des Maxwell'schen Rades selbst, ist Inhalt dieses Kapitels.

Ausgehend von der Definition der grundlegenden Anforderungen wurde der Prototyp konzipiert und die Version 1.0 anschließend gefertigt. Es wurde eine Fehleranalyse durchgeführt, und der Prototyp wurde nach einem strikten Bewertungsschema kontinuierlich bis hin zur Version 1.2, welche zugleich die Endversion darstellt, weiterentwickelt.

Die in der Anforderungsliste genannten Forderungen konnten nicht optimal erfüllt werden, dennoch ist das fertige Produkt unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden zeitlichen und materiellen Ressourcen als akzeptabel zu bewerten.

Es wurde ein einfach zu handhabender, leicht justierbarer Versuchsaufbau geschaffen, welcher die Aufhängemöglichkeit für den pneumatischen Aktuator und den US-Sensor bietet. Er ist autonom zu betreiben und besitzt ausreichende Robustheit gegen Fremdeinwirkungen. Bei der konstruktiven Gestaltung wurde auf die Fertigungsressourcen der hauseigenen Werkstatt geachtet; auf diese Weise konnten, unter zusätzlicher Verwendung von Norm- und Fertigteilen, die Kosten gering gehalten werden.

Die Bahnkurve des Rades mußte auf Kosten von dessen Gesamtenergie über die gesamte Bahnlänge durch Führungsseile gestützt werden, um das Rad im Erfassungsbereich des Sensors zu halten und die Bewegung zu stabilisieren.

7 Konzeption des Versuchsaufbaus (Pneumatik)

7.1 Grundprinzip

Der pneumatische Aktuator reagiert auf Druckgradienten. Es existiert eine Beziehung zwischen Innen- und Außendruck und der effektiven Länge des Aktuators. Setzt man den Außendruck der umgebenden Luft als konstant voraus, so besteht die Steuerungsmöglichkeit der Aktuatorlänge über die Variation des Innendrucks.

Der pneumatische Teil der Stelleinrichtung der Steuerung hat nun einerseits die Aufgabe, den Aktuator mit dem maximal verfügbaren Druck des Hausanschlusses von ca. 6 bar zu beaufschlagen und an einem geeigneten Teil der Bahnkurve (s. Kap. 2.3) den Aktuator langsam wieder zu entlüften.

Es wird davon ausgegangen, daß der Aktuator durch einen höheren Gradienten des inneren Drucks eine höhere Beschleunigung erfährt und so einen größeren Kraftstoß ausübt und mehr Energie am unteren Umkehrpunkt an das Maxwell'sche Rad überträgt. Daher ist ein hoher Nenndurchfluß der Pneumatik anzustreben.

Das 3/2-Wegeventil CPE10-M1H-3GL-QS6 wurde wegen seines relative hohen Nenndurchflusses bei geringen Abmessungen gewählt. Es besitzt Anschlüsse für 6 mm Schläuche. Aus diesem Grunde wird die gesamte Pneumatik auf Basis von 6 mm Schläuchen aufgebaut, bis auf den Entlüftungsstrang, denn dort wird ohnehin gedrosselt.

7.2 Mögliche Realisierungen

7.2.1 Ein 2/2-Wegeventil

Realisiert man die Pneumatikschaltung mit Hilfe nur eines 2/2-Wegeventils, so ergibt sich die in Abb. 32 gezeigte Schaltung. Durch das Magnetventil wird der Aktuator, welcher hier als einfachwirkende ziehende Pneumatikkolben schematisiert dargestellt ist, am Umkehrpunkt mit einem Druck von weniger als 6 bar beaufschlagt, da über das Drosselventil gleichzeitig Luft entweichen kann. Im aufsteigenden Teil der Bahnkurve wird der ursprüngliche Schaltzustand eingenommen und die Luft kann

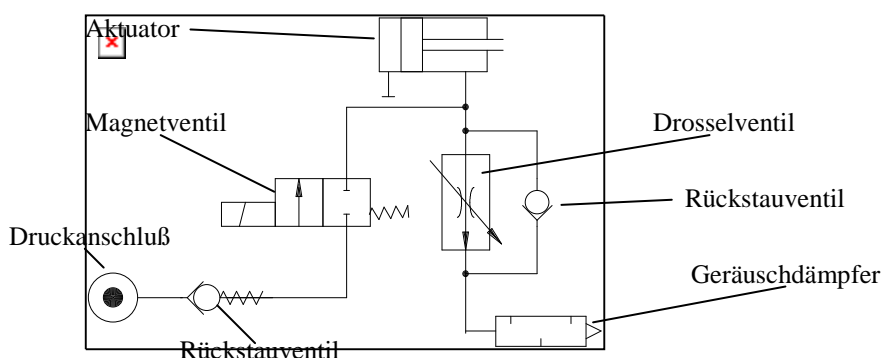


Abbildung 32 : Schaltplan 1, Pneumatik

nun vollends entweichen, bis der Druckausgleich mit der Umgebung erfolgt ist.

Das Drosselventil muß so eingestellt werden, daß die Luft einerseits schnell genug entweicht, daß der Muskel während der Ausdehnphase seine maximale Länge erreicht, bevor der Umkehrpunkt des Maxwell'schen Rades erreicht ist und dieser wieder aus der Maximallänge kontrahieren kann. Gleichzeitig darf die Luft aber nicht

zu schnell während der Kontraktion entweichen, so daß der Luftzustrom in den Muskel hinein möglichst hoch ist und der Muskel maximal kontrahieren kann. Es muß ein möglichst großer Hub erreicht werden.

7.2.2 Zwei 2/2-Wegeventile

Die Schaltung auf Basis zweier 2/2-Wegeventile ist in Abb. 33 dargestellt. Ventil 1 hat die Aufgabe, Luft am Umkehrpunkt zuzuführen und daraufhin zu sperren. Als nächstes öffnet Ventil 2 und entlüftet so den Aktuator über das Drosselventil und den Geräuschkämpfer.

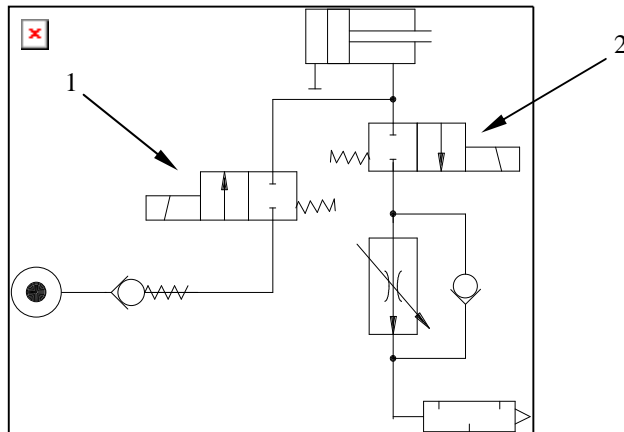


Abbildung 33 : Schaltplan 2, Pneumatik

Die Schaltung hat der in 7.2.1 voraus, daß der Luft während des Aufpumpvorganges keine Entweichmöglichkeit geboten wird. Der innere Druckgradient wird somit erhöht und der Aktuator schneller aufgepumpt. Eine höhere Beschleunigung ist die Folge und eine höhere übertragene Energie.

Nachteil dieser Schaltung ist, das vier Schaltzeitpunkte existieren, welche koordiniert werden müssen und mehr Rechenleistung in einem Echtzeitsteuerungssystem beanspruchen.

7.2.3 Ein 3/2-Wegeventil

Eine Variationsmöglichkeit von 7.2.2 besteht in der Substitution beider 2/2-Wegeventile durch ein 3/2-Wegeventil. Die äquivalente Funktion wird in der Weise realisiert, daß die Druckbeaufschlagung während des Schaltzustands mit anliegendem Steuersignal erfolgt und der Aktuator wieder entlüftet wird, sofern das Potential am Steuereingang das Massenniveau erreicht.

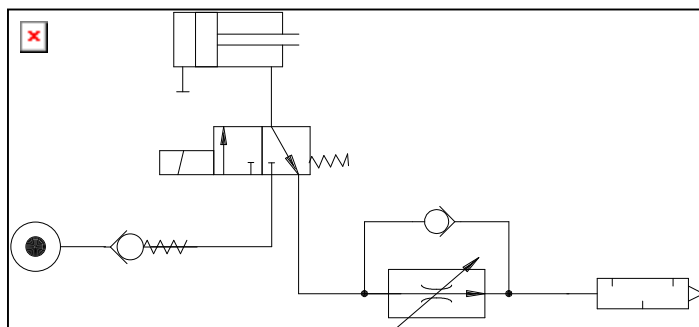


Abbildung 34 : Schaltplan 3, Pneumatik

Vorteil dieser Anordnung sind die geringeren Kosten und zwei Schaltzeitpunkte weniger als bei der Realisierung in 7.2.2 und der höhere Wirkungsgrad als in 7.2.1.

7.3 Bewertung und Auswahl der geeigneten Realisierung

Die Vor- und Nachteile der einzelnen besprochenen Pneumatikschaltungen sind in Abb. 35 gegenübergestellt.

Schaltung	Vorteile	Nachteile
7.2.1	geringe Investitionskosten	geringer Wirkungsgrad
	geringe Rechenleistung erforderlich	
	geringer Platzbedarf	
7.2.2	hoher Wirkungsgrad	hohe Investitionskosten
		hohe Rechenleistung erforderlich
		hoher Platzbedarf
7.2.3	hoher Wirkungsgrad	mittlere Investitionskosten
	geringe Rechenleistung erforderlich	
	geringer Platzbedarf	

Abbildung 35 : Bewertung, mögliche Pneumatikschaltungen

Die optimale und funktional günstigste Variante ist laut Bewertungsschema die in 7.2.3 erläuterte Schaltung. Die geringfügig höheren Investitionskosten gegenüber der in 7.2.1 gezeigten werden zugunsten des erheblich höheren Wirkungsgrades in Kauf genommen.

Die Variante der Pneumatikschaltung in 7.2.3 wird somit für den Versuchsaufbau ausgewählt.

8 Steuerungselektronik

Für die Erzeugung und Übertragung der Steuer- und Sensorsignale werden Schaltungen aus elektronische Komponenten eingesetzt. Es existiert eine Vielzahl an möglichen steuerungstechnischen Realisierungen des elektronischen Versuchsaufbaus, von welcher hier eine Auswahl kurz besprochen werden soll.

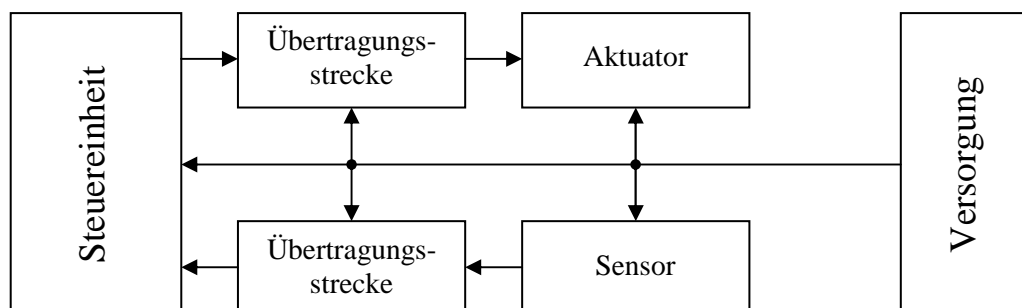


Abbildung 36 : Steuerungssystem, Übersicht

Eine grobe Übersicht der steuerungstechnischen Verknüpfungen zeigt Abb. 36.

8.1 Rechnergestützte Steuerung

Für das PC-basierte Steuerungssystem existieren im wesentlichen zwei mögliche Varianten.

8.1.1 Realisierung durch Software in-the-loop

Bei dieser Variante des Steuerungssystems ist die Software integrierter Bestandteil der geschlossenen Wirkungskette (*in-the-loop*). Sie wertet Sensorsignale aus und erzeugt entsprechende Signalverläufe zur Steuerung des Aktuators.

Bei Echtzeitsystemen ist quantifizierbar, zu welchen Zeitpunkten, bzw. innerhalb welches zeitlichen Intervalls Steuersignale erzeugt werden können. Bei nichtechtzeitfähigen Systemen sind diese Zeitsegmente stark abhängig von einer Reihe von Faktoren, wie z.B. der Systemkonfiguration und Systemauslastung. Daher wird man bei zeitkritischen steuerungstechnischen Anwendungen eher ein Echtzeitsystem wählen.

LabVIEW™ unter Windows NT ist nicht echtzeitfähig. Es existieren aber Möglichkeiten, durch entsprechende Programmierung und Auswahl der Datenerfassungskarten ein quasi in Echtzeit reaktionsfähiges System zu erstellen.

Bei der nichtechtzeitfähigen Variante werden von der Steuerungssoftware Befehl für Befehl die einzelnen Schritte abgearbeitet :

- ➔ 1. Erfassung eines Meßwertes
2. Verarbeitung des Meßwertes
3. Entscheidung über Steuersignalausgabe
4. Steuersignal erzeugen

Es existiert aber keine Kontrollmöglichkeit, wann diese Programmpunkte abgearbeitet werden, da keine zuverlässigen Informationen über den aktuellen und zukünftigen Systemstatus vorliegen. Es läßt sich so keine genaue Aussage über das Zeitverhalten treffen. Dennoch kann sich, sofern der Systemstatus (Konfiguration, Auslastung etc.) konstant ist, durchaus die Varianz der Zeitspannen zwischen den einzelnen abgearbeiteten Schritten in akzeptablen Grenzen bewegen.

Dies wird bei der hier beschriebenen Variante der LabVIEW™-Steuerung vorausgesetzt. In diesem Fall wird zusätzlich zur Datenerfassungskarte lediglich ein Stellglied in Form eines logikpegelgesteuerten Leistungs-MOSFETs (RFP3055LE) benötigt, da der digitale Ausgang, welcher zur Ansteuerung des Magnetventils genutzt wird, einen Strom von 13 mA als Quelle liefern kann. Das Ausgangssignal des US-Sensors kann direkt ohne Signalkonditionierung von der Karte verarbeitet werden. Aufgrund der tieffrequenten Nutzsignalanteile kann auf ein Antialiasingfilter verzichtet werden, welches die Signalbandbreite auf die halbe Abtastfrequenz begrenzt, um Aliasing zu verhindern. Parallel zum Magnetventil muß eine Schutzdiode geschaltet werden, um die beim Abschalten des Ventils entstehende Induktionsspannung (Lenz'sche Regel) kurzzuschließen und ein Zerstören des MOSFET durch Überspannungen zu verhindern. Anstelle des MOSFET kann auch ein Relais verwendet werden.

Der schaltungstechnische Zusammenhang dieser Variante ist Abb. 37 zu entnehmen.

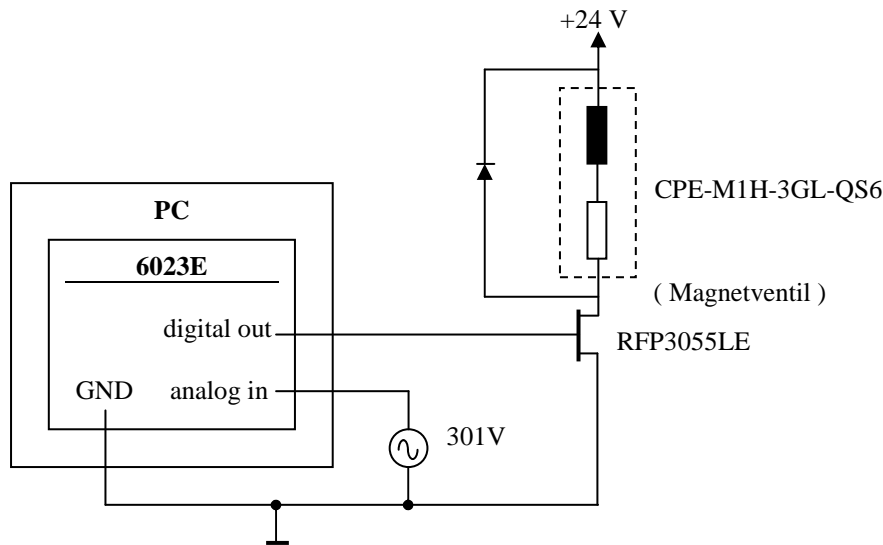


Abbildung 37 : elektronische Schaltung, PC-gesteuert, Software-in-the-Loop

8.1.2 Realisierung durch Programmierung eines Counterchips

Um eine quasi in Echtzeit ablaufende Steuerung zu erhalten, kann die Steuerung auch mittels entsprechender Programmierung des Counterchips der Datenerfassungskarte 6023E realisiert werden. Hierbei führt dieser sämtliche Funktionen, wie Erfassung und Steuerung selbständig aus. Die Software dient nur der Konfigurierung. Sie ist kein Bestandteil des Wirkungskreises mehr. Dadurch wird durch die Software kein Einfluß auf das Zeitverhalten des Systems ausgeübt.

Die Funktion des Counterchips besteht darin, einen Rechteckpuls definierter Länge nach Erfassung eines Triggersignals auszusenden. Der Counterausgang, welcher direkt hinaus auf den Anschlußblock der Datenerfassungskarte geführt wurde, liefert lediglich einen Strom von ca. 3,5 mA. Dies ist für die direkte Ansteuerung eines Relais oder Magnetventils zu wenig. Es könnte wiederum ein MOSFET verwendet werden, da aber für die Konditionierung des Triggersignals ein Operationsverstärker (OPV) benötigt wird und ein Relais schon vorhanden ist, so wird auch für die Ansteuerung des Relais ein weiterer OPV innerhalb eines mehrfach OPV-IC (LM348N) genutzt, um Bauelemente und Platz zu sparen. Dieser OPV wird als Spannungsfolger geschaltet. Er dient so als Impedanzwandler, um einen ausreichenden Strom zur Verfügung zu stellen.

Die Erzeugung des Triggersignals erfolgt mit Hilfe eines OPV in Komparatorschaltung, wobei das Ausgangssignal des US-Sensors an den einen, der Mittelabgriff eines Trimpmpotentiometers an den anderen OPV-Eingang geführt wird. Unterschreitet die Ausgangsspannung des Sensors kurz vor dem Umkehrpunkt einen bestimmten Spannungswert, welcher mit Hilfe des Trimmers eingestellt wurde, so ändert der Komparator seinen Ausgangszustand und dieses Signal dient als Trigger für den Counter, welcher daraufhin den Rechteckpuls erzeugt.

Um die Maximalspannungen für die Eingänge der Meßkarte nicht zu überschreiten, wird die Ausgangsspannung des Komparators über einen Spannungsteiler von 15 V auf ca. 5 V heruntergeteilt. Der negative Schaltzustand des Komparators wird durch die Diode auf nahezu Massenniveau gezogen.

Die elektronische Schaltung ist in Abb. 38 dargestellt.

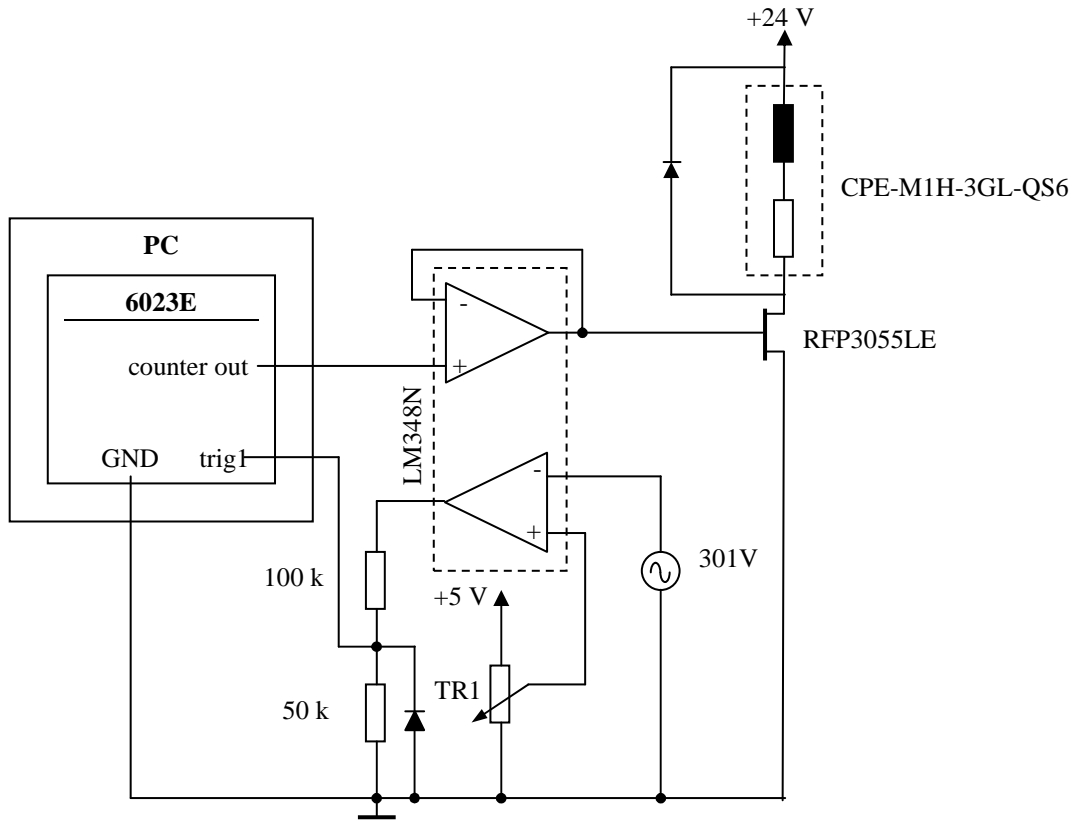


Abbildung 38 : elektronische Schaltung, PC-gesteuert mittels Counterchip

8.2 Einsatz eines Microcontrollers

Soll ein Microcontroller die Steuerungsaufgabe übernehmen, so sind prinzipiell beide in 8.1 besprochenen Möglichkeiten der Realisierung denkbar. Im Falle des Microcontrollers C-Control entfällt allerdings die zweite Möglichkeit, da kein solcher Counterchip zur Verfügung steht. Die Steuerung geschieht also analog zu 8.1.1 in sequentieller Abarbeitung einzelner Programmschritte.

Ebenso ist die Schaltung in 8.1.1 Abb. 37 analog zu übernehmen. Der Vorteil des hier eingesetzten Starterboards von C-Control besteht darin, daß ein Relais und ein Treibertransistor zur Ansteuerung des Relais schon vorhanden sind, so daß im wesentlichen nur Magnetventil und US-Sensor anzuschließen sind. Dieser Transistor ist über einen Jumper direkt mit einem der digitalen Ausgänge des Controllers zu verschalten. Das Relais ist an das Magnetventil anzuschließen. Der Sensor wird direkt mit einem der Eingänge der Analog-Digital-Umsetzer wie in 8.1.1 verbunden. Die entsprechende Schaltung zur Ansteuerung des Relais ist Abb. 39 zu entnehmen.

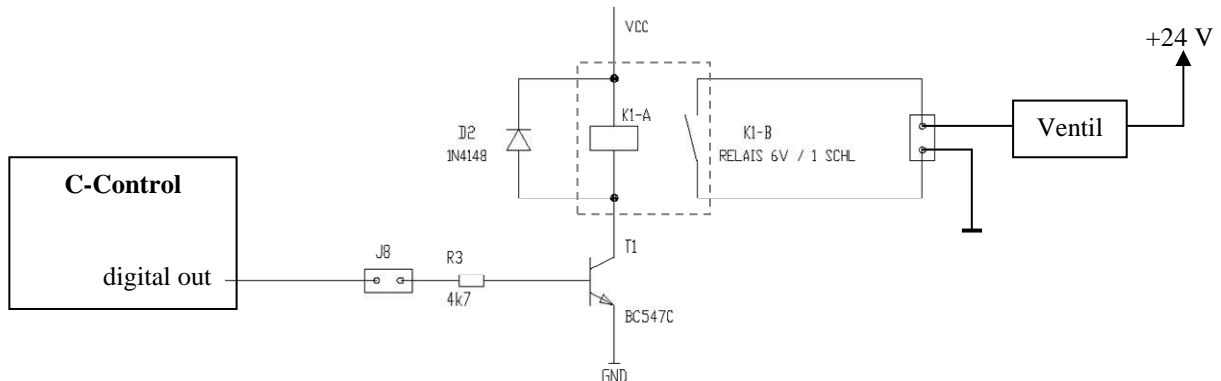


Abbildung 39 : elektronische Schaltung, Relaisansteuerung mit C-Control

9 Steuerungsoftware

9.1 Grundprinzip

Die Software zur Steuerung des Prozesses hat im wesentlichen die folgenden Aufgaben zu erfüllen :

- Erfassung des Sensorsignals
- Verarbeitung des Sensorsignals
- Entscheidung über Steuersignalausgabe
- Erzeugung des Steuersignals

Je nach Realisierungsvariante werden diese Punkte unterschiedlich softwaretechnisch umgesetzt.

Die jeweilige Entwicklungsumgebung (LabVIEW™, C-Control-Basic) stellt bereits entsprechende Swareroutinen zur Ansteuerung der Hardware (Datenerfassungskarte, ADU, Digitale I/O, Counter) zur Verfügung, so daß diesbezüglich keine Low-Level-Programmierung erfolgen muß und die entsprechenden Unterprogramme, welche in Maschinencode vorliegen, direkt eingebunden werden können. So existieren in LabVIEW™ entsprechende graphische VIs (z.B. analog read.vi, analogen Meßwert erfassen) und ebenso in C-Control-Basic äquivalente Klartextstrukturen (z.B. define Mess1 ad[1], Zuordnung der Variablen Mess1 zum ADU Nummer 1, Auslesen von Mess1 liefert Spannungswert).

9.2 Rechnergestützte Steuerung

9.2.1 Realisierung durch Software in-the-loop

Die bei dieser Variante benötigten Hardwarefunktionen sind die Erfassung eines analogen Spannungswertes und die Ausgabe eines Signals auf TTL-Pegel. Das VI, welches direkt die Datenerfassungskarte anspricht, um ein TTL-Signal über einen der digitalen I/O-Ports auszugeben ist in Abb. 40 dargestellt. Es besteht im wesentlichen aus dem Aufruf einer Library Function, deren Inhalt dem Anwender verborgen bleibt. Es können lediglich Parameter übergeben werden, wie z.B. das Signalpattern in Form eines vorzeichenlosen 32-Bit-Integerwertes (unsigned long integer : U32). In anderen VIs wie denen zur Erfassung von Spannungswerten sind auch Rückgabetyperen deklariert, über welche Funktionswerte an die aufrufende Routine übergeben werden.

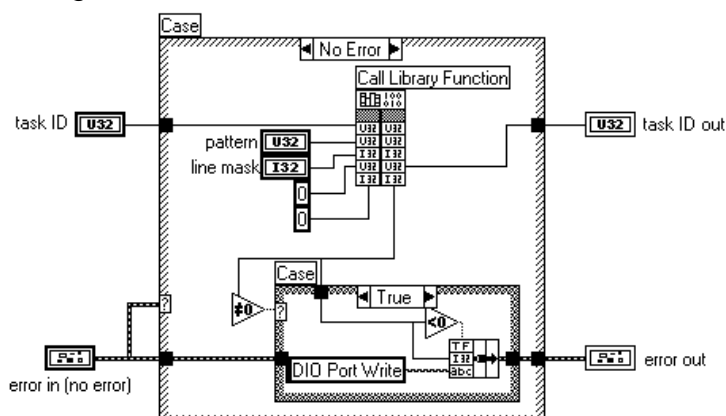


Abbildung 40 : VI-Beispiel, DIO port write.vi

Die Gesamtstruktur des Steuerprogramms für die Variante Software-in-the-Loop zeigt der Ablaufplan in Abb. 41.

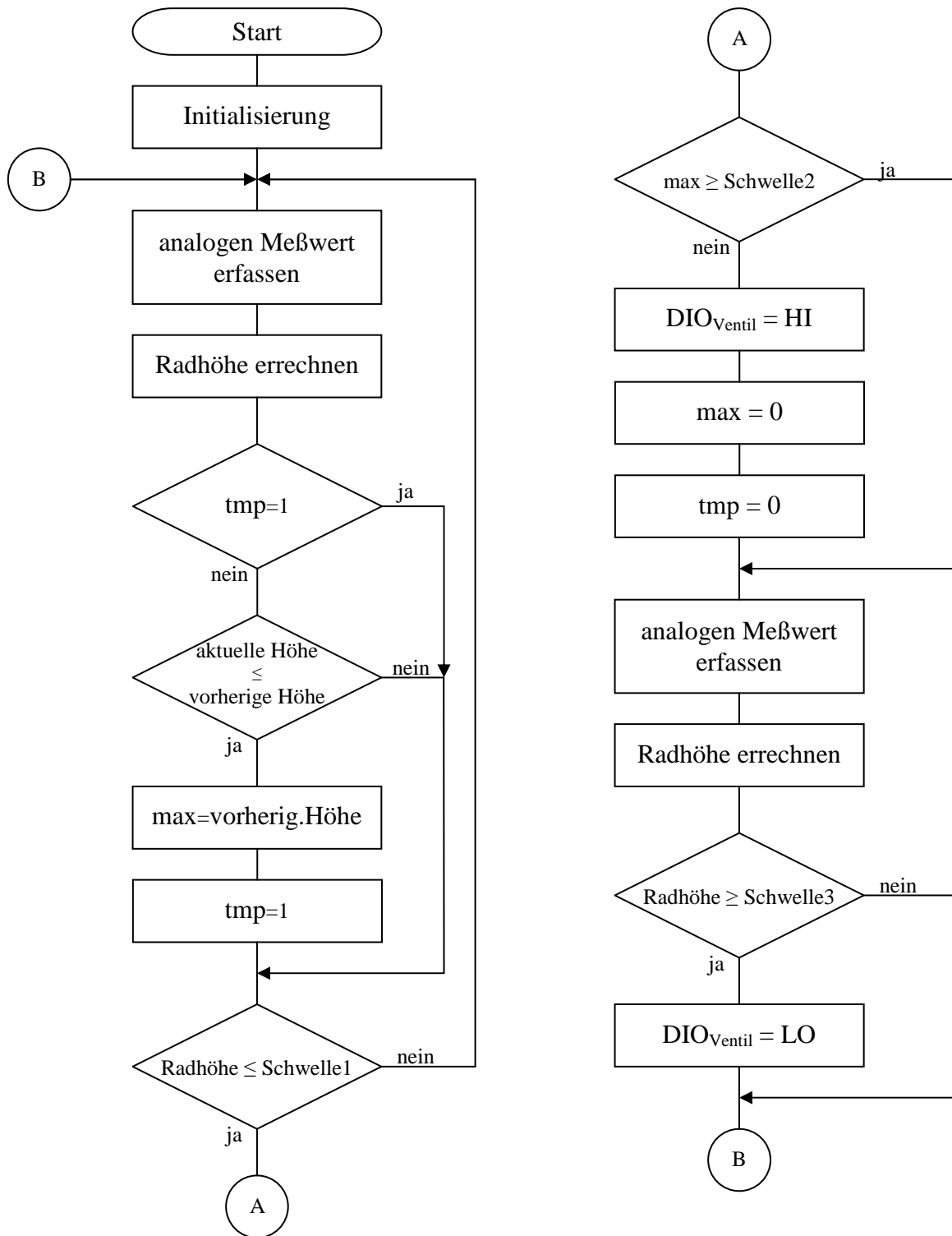


Abbildung 41a : Programmablaufplan, Software in-the-loop

Nach der Initialisierung, welche die Konfiguration des genutzten Analogeingangs festlegt, wird ein analoger Spannungswert erfaßt. Dieser wird in eine entsprechende Höhe des Maxwellrades über dem US-Sensor umgerechnet. Daraufhin wird geprüft, ob die maximale Höhe schon erreicht wurde (aktuelle Höhe < vorherige Höhe). In

diesem Fall wird dieser Wert in der Variablen *max* gespeichert und bezeichnet das lokale Bahnkurvenmaximum. Unterschreitet nun die Radhöhe einen bestimmten ersten Schwellwert und hat zuvor das letzte lokale Höhenmaximum einen bestimmten Grenzwert nicht überschritten, so wird der TTL-Pegel des Digitalausgangs, welcher das Magnetventil schaltet, auf HI gesetzt. Dadurch zieht das Ventil an, und der pneumatische Aktuator kontrahiert. Wurde der Höhengrenzwert (*Schwelle2*) überschritten, so wird die Ausgabe des HI-Pegels umgangen (Magnetventil zieht nicht an), um den Wert des Höhenmaximums wieder unter jenen Grenzwert sinken zu lassen. Dadurch kann das Maxwellrad innerhalb eines Toleranzbandes auf einer bestimmten Maximalhöhe gehalten werden. Überstreicht die Bahnkurve des Rades eine *Schwelle3*, welche etwas höher liegen sollte, als der erste, so wird der Digitalausgang auf LO gesetzt, und der Muskel expandiert, um beim Wiedererreichen des ersten Schwellwertes wieder kontrahieren zu können.

Die Variable *tmp* dient lediglich als Hilfsvariable. Sie wird gesetzt, wenn das lokale Bahnkurvenmaximum erreicht wurde. Dadurch wird verhindert, daß im Abfallenden Teil der Bahnkurve jeder folgende Höhenwert ein neues Maximum signalisiert, da zur Erkennung des Maximums diejenige Bedingung dient, daß der aktuelle Höhenwert kleiner gleich dem vorhergehenden ist.

Der erste Schwellwert sollte sich ein wenig oberhalb des unteren Umkehrpunktes befinden. *Schwelle3* für die Streckphase des Muskels sollte mit der Einstellung des Drosselventils abgestimmt werden, so daß der Muskel vor jeder Kontraktionsphase vollständig expandieren kann.

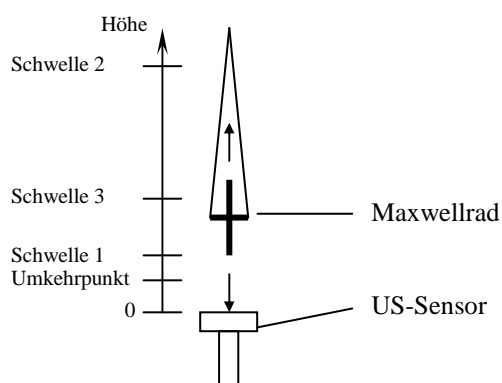


Abbildung 41b : Skizzierung der Schwellwerte

9.2.2 Realisierung mittels Programmierung eines Counterchips

Bei dieser Variante wird der Counterchip DAQ-STC der Datenerfassungskarte 6023E so programmiert, daß dieser nach Erhalten des von der Schaltung in 8.1.2 erzeugten Triggersignals einen TTL-Puls definierter Länge aussendet.

Dies hat den Vorteil, daß der Algorithmus unabhängig von der Systemauslastung des PC allein auf der Datenerfassungskarte abläuft. Es ist so ein besseres Zeitverhalten, d.h. eine höhere Reproduzierbarkeit der Kontraktionszeitpunkte des Aktuators zu erwarten. Dies sollte eine höhere Energiezufuhr bei optimaler Justierung des Schaltzeitpunktes zur Folge haben.

Die Programmstruktur ist in Abb. 42 aufgezeigt.

Während der Initialisierung werden der Counterchip und der für die Höhenerfassung genutzte Analogeingang entsprechend konfiguriert. Daraufhin wird die zeitliche

Länge des auszugebenden TTL-Pulses festgelegt. Es wird kontinuierlich das Ausgangssignal des US-Sensors abgetastet und analog zu 9.2.1 der Maximalwert der Radhöhe bestimmt. Sinkt das Rad unter einen definierten Schwellwert, so wird der Counter gestartet. Er wartet nun auf das Triggersignal, um daraufhin den TTL-Puls zur Ansteuerung des Magnetventils ausgeben zu können. Ist der untere Umkehrpunkt des Rades erreicht worden, so wird die Hilfsvariable *tmp* zurückgesetzt, wodurch das nächste Höhenmaximum bestimmt werden kann.

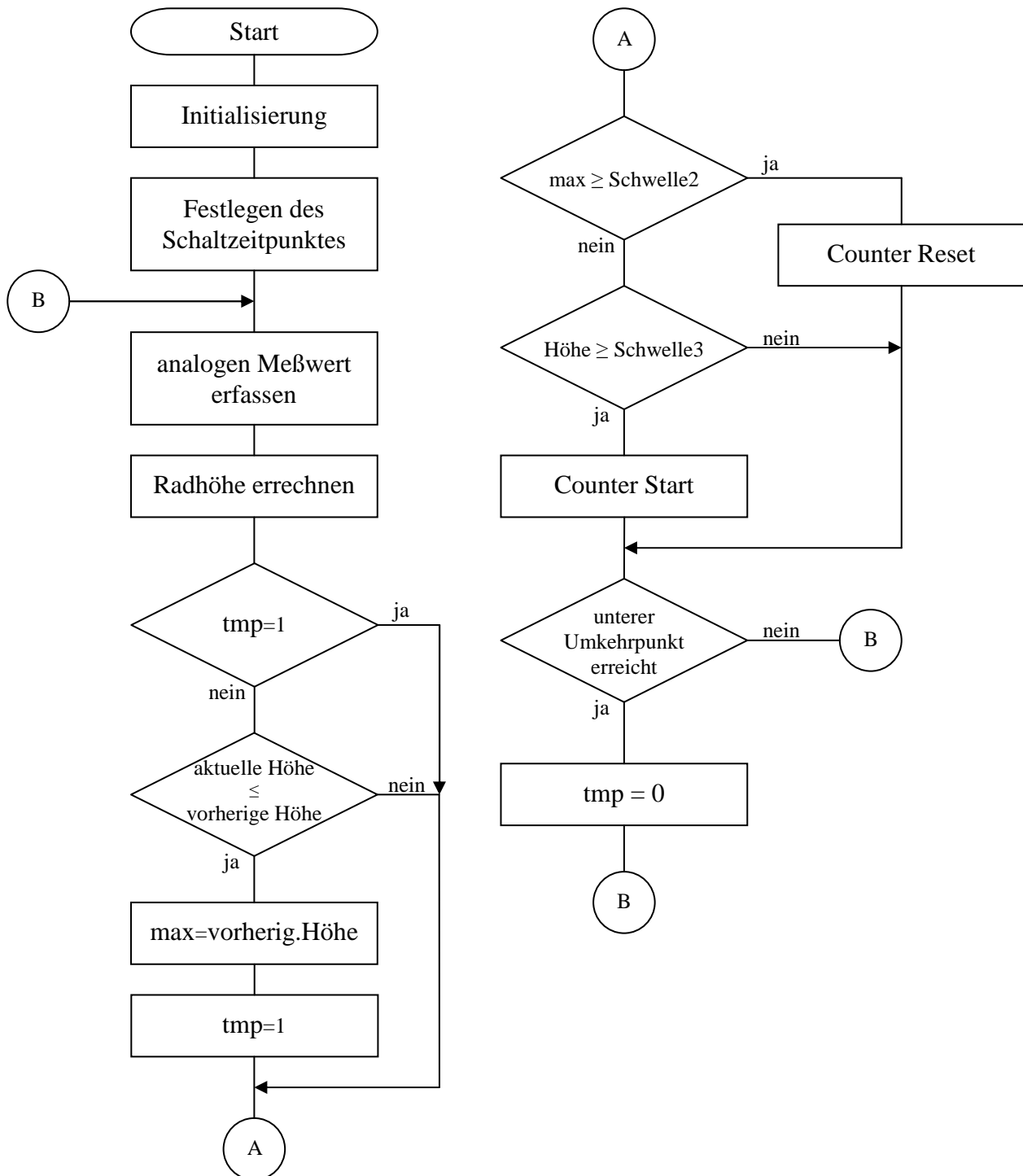


Abbildung 41 : Programmablaufplan, Countersteuerung

Sobald der Maximalwert der Radhöhe einen Grenzwert überschreitet, wird der Counter zurückgesetzt, so daß er keinen TTL-Puls aussendet, wenn das nächste Triggersignal anliegt. Dadurch kontrahiert der Aktuator beim nächsten Erreichen des unteren Umkehrpunktes nicht, und das Höhenmaximum kann wieder abfallen. Überschreitet das Rad wiederum einen Schwellwert, so wird der Counter wieder gestartet und so für das nächste Aussenden des TTL-Pulses vorbereitet. Der Höhenschwellwert für das Triggersignal wird mittels des Trimmers TR1 (s. Abb. 38) eingestellt. Schwellwert2 für den Counterstart sollte mit der Einstellung des Drosselventils abgestimmt werden, so daß der Muskel vor jeder Kontraktionsphase vollständig expandieren kann.

9.3 Einsatz eines Microcontrollers

Wird C-Control anstelle eines PCs eingesetzt, so läuft der auf diesem implementierte Programmalgorithmus wieder als teil des geschlossenen Wirkungskreises ab. Alle Befehle müssen also in Echtzeit verarbeitet werden, da die in 9.2.2 besprochene Counterprogrammierung nicht implementiert werden kann.

Der Steueralgorithmus entspricht exakt dem in 9.2.2 und wird daher hier nicht weiter behandelt.

Im Gegensatz zu den in LabVIEW™ vorhandenen Routinen zur Hardwareansteuerung ist bei C-Control-Basic die Schnittstelle zum ADU in Form einer Datentypsdeklaration definiert. Es wird dem gewünschten Analogeingang eine Variable zugeordnet, deren Wert dann automatisch mit jedem gewandelten Spannungswert aktualisiert wird. Wird diese ausgelesen, so erhält man den letzten erfaßten Spannungswert des ADU. In dem folgenden Beispiel ist dies anhand eines Programms illustriert, welches den vom ADU 1 umgesetzten Spannungswert kontinuierlich ausliest und ausgibt.

Beispiel :

```
define mess1 ad[1]      // Zuordnung der Variablen mess1 zum ADU 1
#sprung                // Label
print mess1            // Ausgabe des in Variable mess1 gespeicherten
                       // Spannungswertes
goto sprung             // Programm bei Label „sprung“ fortsetzen
```

Für den Digitalausgang, welcher das Relais für das Magnetventil ansteuert, gilt dies analog.

Es läßt sich leider keine Aussage über die Abtastfrequenz treffen, welche aus der o.g. Routine resultiert. Dazu wäre eine exakte Kenntnis der Abarbeitungsgeschwindigkeit der einzelnen Makrobefehle nötig. Eine Einstellmöglichkeit der Abtastfrequenz wäre der Einbezug des internen Timers des Microcontrollers, so daß nach definierten zeitlichen Abständen abgetastet wird. Aber selbst auf diese Weise ist nicht bekannt, welche Zeitspanne zwischen Abfrage des Timers und Abtastung verstreicht.

Wichtig bei der Implementation in C-Control-Basic ist, daß der 8-Bit-umgesetzte Spannungswert in Form eines Byte übergeben wird. Der Wertebereich ist also eine ganze Zahl zwischen 0 und 255. Da beim autonomen Betrieb keine Werteausgabe an den Anwender erfolgt, kann die Umrechnung des Spannungswertes in eine physikalische Höhe entfallen. Die Schwellwerte sind dann aus dem Definitionsbereich zu wählen, der identisch mit dem genannten Wertebereich ist.

Im Gegensatz zur Implementation in LabVIEW™ besitzt ein Microcontroller den Vorteil, daß nur der Steuerungsalgorithmus von dem Prozessor abgearbeitet wird und keine Rechenzeit mit Prozessen geteilt werden muß. Daher ist ein Microcontroller sehr wohl für die Einbettung in eine geschlossene Wirkungskette geeignet, um Steuerungsaufgaben in Echtzeit zu bewältigen. Aus genau demselben Grunde ist auch eine erheblich höhere Zuverlässigkeit der Steuerung zu erwarten.

9.4 Bewertung

Es war mit allen Versionen der Aktuatorsteuerung möglich, den oberen Umkehrpunkt der Bahnkurve des Maxwell'schen Rades aus einer bestimmten Höhe zu halten. Bei entsprechender Justage der Hörschwellwerte für die Schaltzeitpunkte des Magnetventils gelang es, bei einer Anfangshöhe von ca. 5-10 cm eine allmähliche Steigerung der Maximalhöhe um ca. 1-2 cm zu erreichen. Größeren Anfangshöhen führten zu einer Abnahme der Maximalhöhe bis zu einem gewissen Niveau, welches ungefähr bei dem aus einer Anfangshöhe von 5-10 cm erreichten entsprach.

Das System reagierte sehr sensibel auf Variation des unteren Schwellwertes um wenige Hundertstel Volt. Weiterhin war eine starke Abhängigkeit vom Luftdruck des Hausanschlusses zu bemerken, welcher bei ca. 6 bar liegen sollte, um eine Höhe von 5 cm zuverlässig zu halten. Nach Gl. 28 ist die Aktuatorkraft druckabhängig.

Größere Steigerungen der Maximalhöhe als um ca. 2 cm waren nicht möglich. Diese Grenze wurde wahrscheinlich einerseits durch den relativ geringen Nenndurchfluß des Ventil und andererseits durch den zur Verfügung stehenden Druck des Hausanschlusses gesetzt.

Es konnte kein Unterschied der aus den beiden PC-basierten Versionen der Aktuatorsteuerung resultierenden Bahnkurve des Maxwell'schen Rades beobachtet werden. Die Erwartung einer verbesserten Energieübertragung mittels der Counterchipprogrammierung wurde nicht erfüllt. Als Grund hierfür wäre eine zeitliche Streuung des Triggerzeitpunktes möglich, wofür Ursachen wie Drift der Referenzspannung oder Drift des OPV in Frage kämen.

Auch mit der Microcontrollersteuerung konnte keine höhere Effektivität erzielt werden. Es gelang ebenfalls, ein Hörsniveau von ca. 5-10 cm zu halten.

Es zeichnete sich daher keine der hier untersuchten Steuerungstechniken durch besondere Effektivität aus.

9.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden verschiedene Möglichkeiten der Programmierung des Steuerungssystems in Zusammenhang mit den verwendeten elektronischen Komponenten besprochen. Es wurden die Eigenheiten jeder Variante, insbesondere in Bezug auf die Echtzeitfähigkeit, herausgestellt und die Algorithmen wurden schrittweise erläutert.

Nach der Implementation wurden die Steuerungsvarianten in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit beurteilt und es wurde festgehalten, daß sich in der Praxis keine der drei Realisierungen durch herausragende Leistungsfähigkeit betreffend der hier entwickelten Steuerungsaufgabe auszeichnete. Dennoch erfüllten alle Varianten die Grundfunktion, das Maxwell'sche Rad auf einer konstanten Höhe zu halten, wengleich diese sich nur in einem Bereich weniger Zentimeter bewegte.

Abschließend wurden Ursachen für die Unmöglichkeit, mit der gegenwärtigen Systemkonfiguration einen größeren Hub zu erreichen, dargelegt

Es kann festgehalten werden, daß die Implementation auf einem Microcontroller für die Systemsteuerung in einem alleinstehenden PC-unabhängigen Versuchsaufbau

aufgrund ihrer höheren Zuverlässigkeit im Gegensatz zu einem Windows-basierten System sehr viel besser geeignet ist.

10 Verlauf der Höhenmaxima des Maxwell'schen Rades

Es existieren prinzipiell vier mögliche Formen von Folgen der Maximalwerte der Radhöhe. Diese sind in Abb. 42 skizziert.

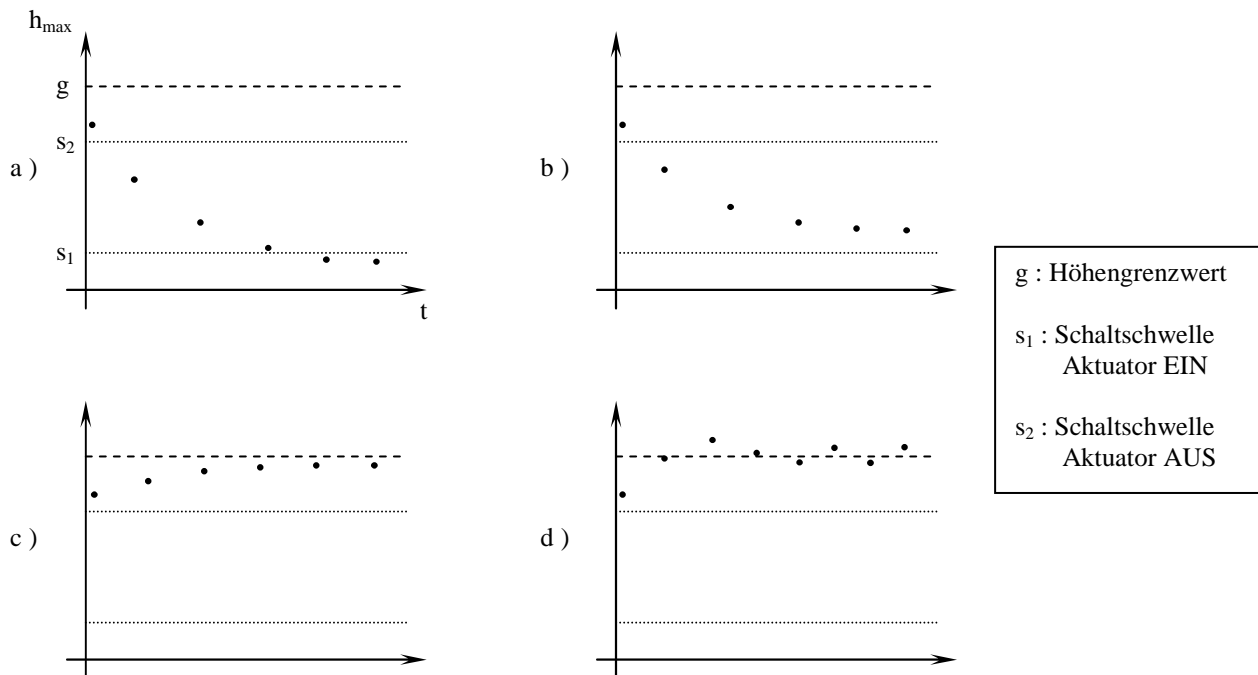


Abbildung 42 : mögliche Folgen der Höhenmaxima des Maxwell'schen Rades

Bei Fall 42a genügt die zugeführte Energie des Aktuators nicht, um das Maxwellrad auf einer konstanten Höhe zu halten. Das Rad kommt irgendwann zum Stillstand. Fall 42b zeigt die Folge der Höhenmaxima für eine ausreichende Energiezufuhr, um das Rad auf einem Höhenniveau unterhalb der Anfangshöhe zu halten. In Fall 42c wird soviel Energie übertragen, daß das Rad seine Maximalhöhe noch über den Anfangswert hinaus steigern kann. In Fall 42d letztlich kann die Höhe sogar über einen definierten Grenzwert hinaus gesteigert werden, wonach jeweils das Zurückfallen der Maximalhöhe unter diese Schwelle abgewartet wird, bis wiederum Energie durch den Aktuator zugeführt wird.

Im wesentlichen abhängig von der Justage des Schwellwertes für den Schaltzeitpunkt des Magnetventils wurden in der Praxis alle Verläufe der Bahnkurvenmaxima beobachtet. Im unzureichend justierten Zustand stellte sich meist der Verlauf in Abb. 42a ein. Wurde der Schwellwert so eingestellt, daß der Impuls des Aktuators etwa zu dem in 2.3 besprochenen Zeitpunkt übertragen wurde, war mindestens der Verlauf in Abb. 42b zu beobachten. Eine noch bessere Folge wie in Abb. 42c war nur mit einer Anfangshöhe im Bereich von 5-10 cm und einer sehr langsamen Expansionsphase zu erreichen, wobei diese etwas vor Erreichen des Maximums mit Hilfe des entsprechenden Schwellwertes begonnen werden sollte.

11 Spannungsversorgung

Um den Versuchsaufbau alleinstehend ohne externe Peripherie betreiben zu können, müssen die entsprechenden Gleichspannungen für das C-Control-Starterboard, den US-Sensor und auch für das Magnetventil bereitgestellt werden. Hierfür wurde ein internes Netzgerät entwickelt, welches über einen Kaltgerätestecker aus dem 230 V AC Netz zu versorgen ist.

Für das Magnetventil ist eine Nennleistung von ca. 1 W angegeben, für den Sensor, welcher bei einer Gleichspannung von 10-30 V betrieben werden kann, eine Stromaufnahme von weniger als 25 mA, was bei einer Spannung von 24 V einer Leistung von ca. 0,6 VA entspricht. Es wurde daher – und aus Kostengründen - ein Transformator TR 1 mit einer Nennleistung von 16 VA bei 30 V Sekundärspannung gewählt, um eine ausreichende Reserve sicherzustellen. Die Stromaufnahme der C-Control-Mainunit ist mit ca. 30 mA angegeben; dies entspricht etwa 0,15 VA bei 5 V DC. Wird diese zusammen mit dem Starterboard betrieben, so kommen einige Verbraucher, wie Spannungsregler, Transistoren, Relais und Verluste, hinzu. Die Stromaufnahme des Starterboards ist nicht bekannt. Eine Leistung von 1,5 VA sollte allerdings ausreichend sein, so daß ein Transformator TR 2 mit 1,5 VA bei 9 V Sekundärspannung für die Versorgung der C-Control-Komponenten gewählt wurde. Das Starterboard besitzt eine integrierte Spannungsstabilisierung auf Basis eines LM7805-Spannungsreglers. Es muß daher nur eine ungestabilisierte Gleichspannung größer als etwa 8 V zur Verfügung gestellt werden. Die 9 V Sekundärspannung des Transformators werden daher über einen Brückengleichrichter gleichgerichtet und durch einen Elektrolytkondensator (Elko) von 470 µF geglättet.

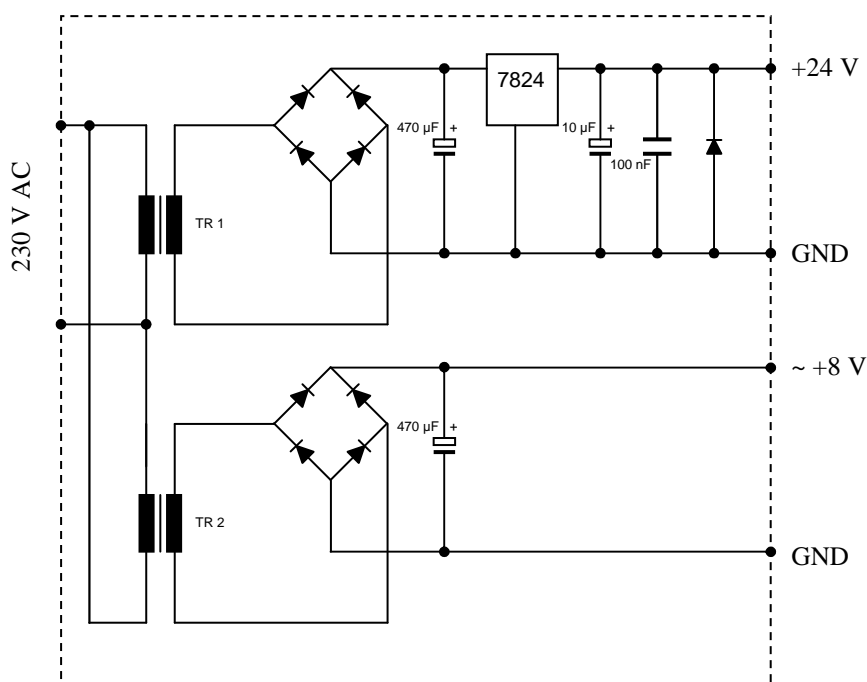


Abbildung 43 : elektronische Schaltung, Netzteil

Für das Magnetventil spielt die Stabilisierung der Spannung keine Rolle, wohl aber für den Sensor. Die gleichgerichtete und über einen 470 µF Elko geglättete 30 V Sekundärspannung des Transformators wird daher von einem Spannungsregler (LM7824CT) auf 24 V DC geregelt. Durch den Regler erzeugte Störfrequenzen

werden über einen 100 nF Kondensator gefiltert. Als Puffer dient ein nachgeschalteter 10 µF Elko. Letztlich wurde, um den Regler gegen Verpolung zu schützen, noch eine Schutzdiode eingefügt.

Die Gesamtschaltung des Netzteils ist Abb. 43 zu entnehmen.

Es ist nicht empfehlenswert, den in das Starterboard integrierten Spannungsregler LM7805 an einer sekundären Transformatorspannung von 30 V zu betreiben, um den Transformator TR 2 einsparen zu können, da die enorm hohe Verlustleistung, welche an dem Regler erzeugt würde einerseits eine unangemessen hohe Stromaufnahme zur Folge hätte und folglich höhere Kosten im Dauerbetrieb verursachte und andererseits eine sehr starke Kühlung erforderlich wäre, um eine thermische Zerstörung des Bauteils zu verhindern.

12 Abschließende Betrachtung des Versuchsaufbaus

Der fertige Versuchsaufbau bestehend aus Stativ, Pneumatik, Microcontrollersteuerung und Netzteil wird nun abschließend beurteilt. Hierzu wird an einem rechnergestützten Meßplatz unter LabVIEW™ der Verlauf der Ausgangsspannung des US-Sensors aufgenommen um die Bahnkurve des Rades analysieren zu können.

12.1 Bahnkurve des Maxwell'schen Rades

Um die Bahnkurve des Rades zu beurteilen, wurde in einem Auslaufversuch der Höhenverlauf des Rades über der Zeit bei expandiertem pneumatischen Aktuator aufgenommen.

In einem zweiten Versuch wurde bei aktiver Microcontrollersteuerung für jede Bahnperiode jeweils die Maximalhöhe bestimmt und die resultierende Folge der Maxima aufgenommen.

Da das eingeplante Magnetventil CPE10-M1H-3GL-QS6 nicht zur Verfügung stand, wurde der Versuch mit dem Ventil MSV-2 und der Pneumatikschaltung nach 7.2.1 durchgeführt. Da das MSV-2 über einen geringeren Nenndurchfluß von nur ca. 50 l/min und niedrigere Schaltgeschwindigkeiten verfügt, ist zu erwarten, daß die Steuerung des Aktuators unter Verwendung des CPE10-M1H-3GL-QS6 mindestens die Leistung des MSV-2 erbringt.

12.1.1 Rechnergestützte Messung

Die Erfassung des Ausgangssignals des US-Sensors wurde mittels der Datenerfassungskarte 6023E unter LabVIEW™ durchgeführt. Es wurde ein entsprechendes VI geschrieben, welches die analogen Spannungswerte erfaßt, in einem Puffer zwischenspeichert und dessen Inhalt nach erfolgter Akquisition in eine Datei schreibt.

Als Puffer wird ein Speicherbereich im PC-RAM zugewiesen. Der Zugriff von der Meßkarte erfolgt über DMA. Wegen der großen zu erwartenden zeitlichen Ausdehnung des Auslaufversuches wird eine niedrige Abtastperiode von 400 ms gewählt.

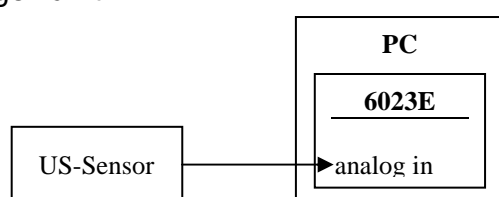


Abbildung 44 : Erfassung der Bahnkurve, Blockschaltbild

12.1.2 Auslaufversuch

Der aus dem Auslaufversuch erhaltene Datensatz ist in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

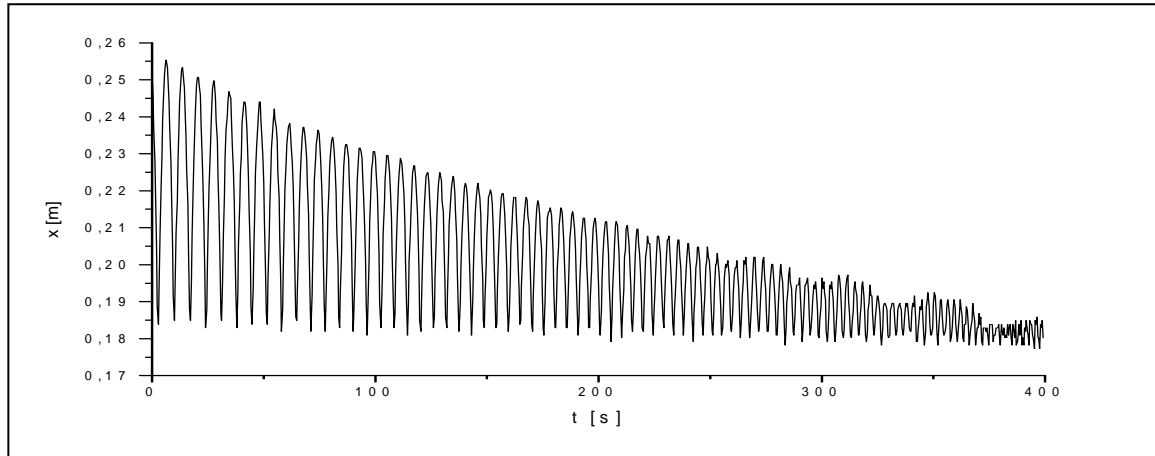


Abbildung 45 : Bahnkurve, Auslaufversuch

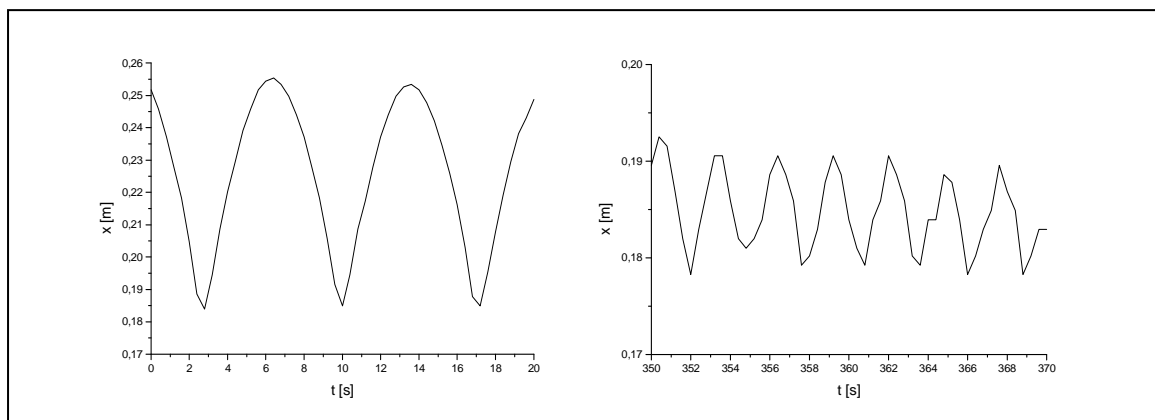


Abbildung 46 : Bahnkurve, Ausschnitt

Die lokalen Maximalhöhen der Bahnkurve nehmen exponentiell ab. Gleichzeitig verringert sich die Periodendauer mit kleiner werdender Maximalhöhe.

Es sind regelmäßig wiederkehrende von der idealen Exponentialfunktion abweichende Strukturen zu erkennen, deren Ausprägung mit sinkender Maximalhöhe zu nimmt. Diese sind der Schwingung des Rades um dessen Hochachse zuzuschreiben. Die Zunahme der Schwingungen mit fallender Maximalhöhe kann jedoch nicht erklärt werden.

In Abb. 47 sind zusätzlich zum Höhendiagramm die ersten und zweiten Ableitungen der Wertepaare des Datensatzes dargestellt. Es sind die in 2.2.3 beschriebenen Verläufe zu erkennen.

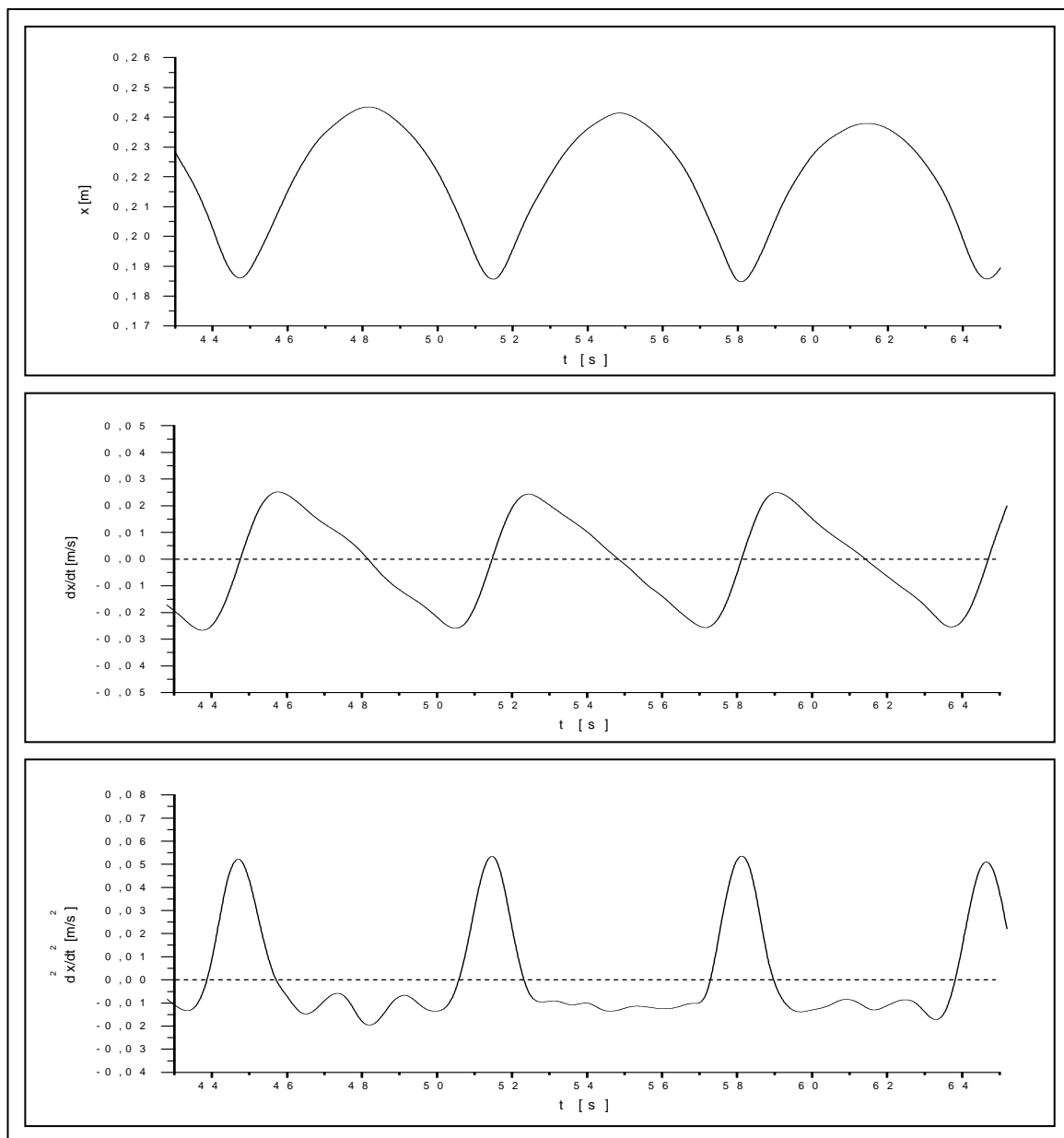


Abbildung 47 : Bahnkurve und Ableitungen

Die Abtastfrequenz war wegen der großen zeitlichen Ausdehnung des Auslaufversuches mit 2,5 Hz sehr niedrig gewählt. Daher ist die zeitliche Auflösung ebenfalls relativ gering. Die Peaks der zweiten Ableitung sind demnach um einiges breiter, als zu erwarten war. Ebenso ist die Übergangsphase von negativer zu positiver Geschwindigkeit gestreckt. Dennoch spiegeln die Kurven sehr gut die erwarteten Verhältnisse wieder.

12.1.3 Verlauf der Maximalhöhen des Maxwell'schen Rades bei aktiver Steuerung

Aufgrund der Überlagerung der Bahnkurve des Maxwellrades mit der Kontraktions- und Expansionsbewegung des pneumatischen Aktuators ist eine kontinuierliche Betrachtung der Meßdaten der Radhöhe nicht sehr aussagekräftig. Insbesondere die lokalen Maxima der Bahnkurve hängen jeweils vom aktuellen Zustand des Aktuators ab. Dennoch wurden bei aktiver Microcontrollersteuerung entsprechend 12.1.1 kontinuierlich Meßwerte der Radhöhe aufgenommen und analog zu 9.2.1 jeweils die lokalen Maxima der Bahnkurve ermittelt.

Es ergab sich die in Abb. 48 dargestellte Folge.

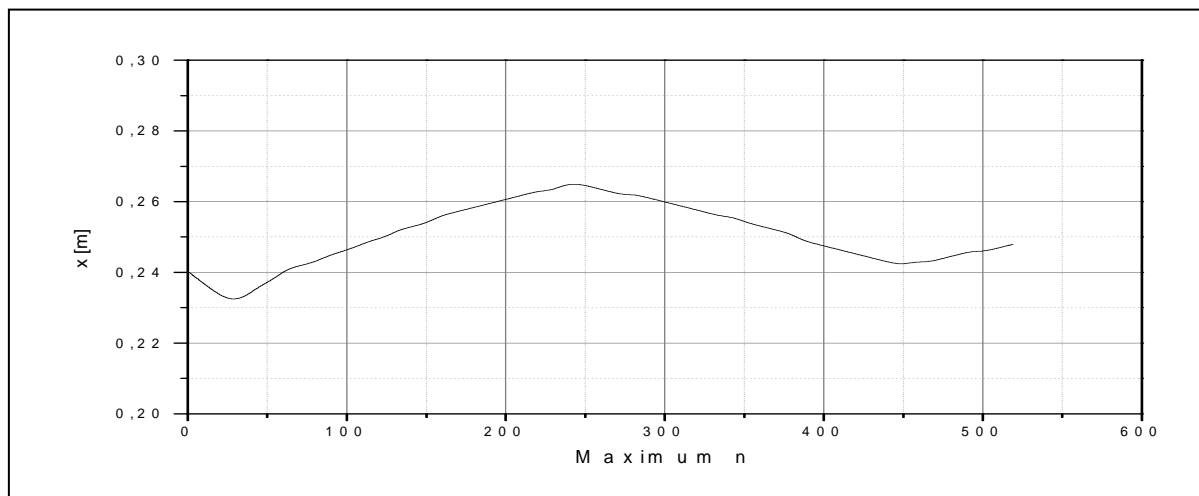


Abbildung 48 : Bahnkurvenmaxima

Das System wurde ausgehend von einer Anfangshöhe bei 24 cm über dem US-Sensor sich selbst überlassen.

Es war daraufhin ein leichter Abfall der Bahnkurvenmaxima um ca. 0,8 cm auf 23,2 cm zu bemerken. Nach einem lokalen Minimum stiegen die Werte der Maxima an bis zu einem Maximum von ca. 26,5 cm. Es folgt wieder ein Abfall auf ca. 24 cm, woraufhin die Tendenz wieder ansteigend ist.

Der Verlauf der Kurve ist näherungsweise periodisch und pendelt um eine Höhe von ca. 25 cm. Bezüglich dieses Mittelwertes wurde insgesamt durch den Aktuator die durchschnittliche Maximalhöhe des Maxwellrades um ca. 1 cm gesteigert. Lokal wurde ein Hub von ca. 3,3 cm erreicht.

Die Gesamtzeit des Versuchs betrug ca. 50 min. Die Periodendauer des in Abb. 48 gezeigten Kurvenverlaufes beträgt demnach ungefähr 40 min.

Bei mehrmaliger Wiederholung des Versuches nach einem Druckabfall der Hausleitung auf ca. 5 bar wurde festgestellt, daß die Höhe des Rades nur in Einzelfällen mehrere Minuten gehalten werden konnte, bei der Mehrzahl der Testläufe jedoch das Rad auslief, bis es zur Ruhe kam.

Bei einer erhöhten Umgebungstemperatur fiel auf, daß die Führungsseile an Spannung verloren. Dies ist wahrscheinlich mit einem wärmeabhängigen Dehnungskoeffizienten zu erklären. Die Folge war ein erhöhtes Schwingen des Maxwellrades, da durch die erhöhte Länge der Seile mehr Weg in horizontaler

Richtung für das Rad zur Verfügung stand und sich so die Schwingungsamplitude erhöhte.

12.1.4 Zeitdiagramm

Die zeitliche Abfolge aller relevanten Ereignisse innerhalb des microcontrollerbasierten Steuerungssystems ist in Abb. 49 skizziert.

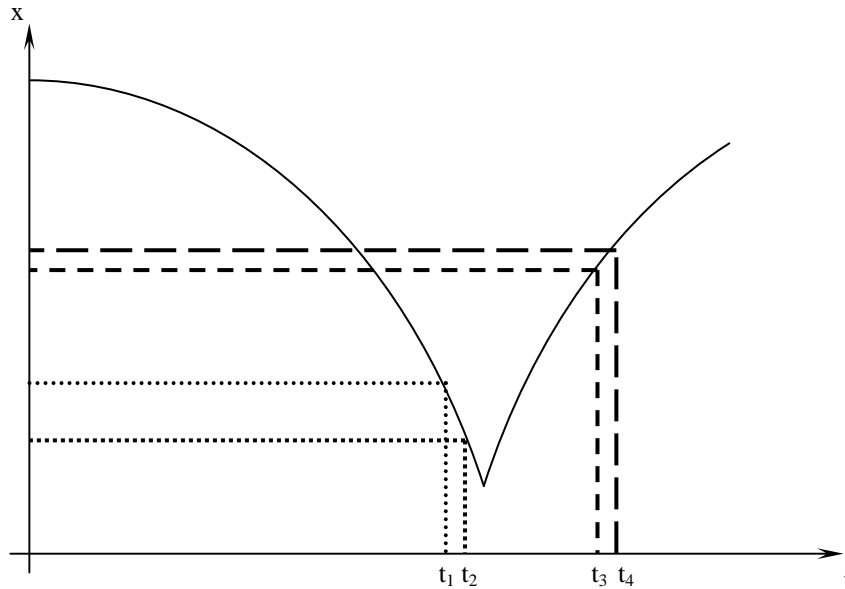


Abbildung 49 : Zeitdiagramm der Steuerungsereignisse

Der Zeitpunkt t_1 bezeichnet dabei das physikalische Erreichen der eingestellten unteren Schaltschwelle, bzw. der entsprechenden Höhe, durch das Maxwellrad. Es folgt nach gewisser Verzögerung t_2 und das Schalten des Magnetventils auf Zulauf, was gleichbedeutend ist mit der Kontraktion des Aktuators. Während der aufsteigenden Phase des Rades wird kurze Zeit später t_3 für das Erreichen der oberen Schaltschwelle überstrichen, worauf letztlich das Rückschalten des Ventils auf Auslaß und so das Einleiten der Expansionsphase des Aktuators bei t_4 stattfindet. Dieser Vorgang wiederholt sich kontinuierlich.

12.1.5 Einstellungen

Gute Ergebnisse der Microcontrollersteuerung konnten mit der folgenden Einstellung erzielt werden :

Obere Schaltschwelle	:	65
Untere Schaltschwelle	:	57
Anfangshöhe	:	~ 10 cm über unterem Umkehrpunkt
Höhe Umkehrpunktes über US-Sensor	:	ca. 18 cm
Leitungsdruck des Hausanschlusses	:	ca. 6 bar

12.2 Gesamtbewertung der Funktionalität

In dem Verlauf der Bahnkurve des Maxwell'schen Rades war trotz der Führungsseile ein starkes Schwingen des Rades um die Hochachse zu erkennen. Dennoch hielten

sich die Energieverluste in Grenzen, so daß ein vollständiges zur Ruhe kommen aus einer Anfangshöhe von ca. 8 cm über der Ruheposition erst nach 7 min erfolgte ! Unter diesem Aspekt erfüllte der mechanische Versuchsaufbau seine Funktion sehr gut.

Die Betrachtung des Verlaufes der Höhenmaxima des Rades lies erkennen, daß der Aktuator unter Verwendung der C-Control-Steuerung, der Pneumatikschaltung nach 7.2.1 mit Ventil MSV-2 und des Stativs eine Steigerung der maximalen Radhöhe um durchschnittlich 1 cm bei einer Anfangshöhe von ca. 6 cm über der Ruheposition leistete. Unter Vernachlässigung des Oszillierens um die Durchschnittshöhe gelang es dem Aktuator die Ausgangshöhe zu halten und zu steigern. Das Stell- und Steuerungssystem erfüllte demnach ebenfalls seine Aufgabe mindestens akzeptabel. Insgesamt betrachtet gelang es in dieser Arbeit, den geforderten Versuchsaufbau zu entwerfen und zu realisieren, welcher dem Maxwell'schen Rad seine während des Bewegungsablaufes verlorengangene Energie wieder zuführt. Es kann davon ausgegangen werden, daß unter Voraussetzung der Verwendung eines entsprechend robusten Fasermaterials der Steuerungsvorgang beliebig lange fortgeführt werden kann.

Die Temperaturabhängigkeit der Führungsseillänge erfordert allerdings eine regelmäßige Nachjustage der Spannvorrichtung.

Es ist darauf zu achten, daß ein ausreichend hoher Leitungsdruck des Druckanschlusses von ca. 6 bar zur Verfügung steht. Geringere Drücke haben einen geringeren Aktuatorhub und eine niedrigere Strömungsgeschwindigkeit und so eine geringere Aktuatorgeschwindigkeit zur Folge.

12.3 Steuerung vs. Regelung

Die Energiezufuhr des Systems genügte lediglich, um eine Anfangshöhe des Maxwell'schen Rades um wenige Zentimeter zu steigern. Es handelt sich bei der Versuchsanordnung im justierten Zustand um einen selbstregelnden Prozeß. Dieser Prozeß verläuft abgesehen von einer Oszillation um eine Durchschnittshöhe stabil. Es konnte eine gewisse Robustheit der Steuerung gegen äußere Störungen, wie kurzzeitige Unterbrechung des Sensorsignals oder Störmomente am Rotationskörper, festgestellt werden. Es kann kein wesentlicher Vorteil aus einem regelnden Eingriff von Seiten der Elektronik gezogen werden. Daher wird auf die Implementation von einem Regelalgorithmus verzichtet.

12.4 Verbesserungsvorschläge

Um ein besseres **Zeitverhalten der Steuerung** zu erhalten, können

- Magnetventile mit schnelleren Schaltzeiten
- Transistoren anstelle von Relais
- Microcontroller mit höherem Systemtakt

verwendet werden. Denkbar wäre auch ein reines Schaltnetz als elektronische Steuerung.

Weiterhin könnte nach Lösungsmöglichkeiten gesucht werden, eine Triggersteuerung analog zu 9.2.2 mittels eines Microcontrollers mit entsprechendem Funktionsumfang zu realisieren.

Ein größerer **Gesamthub** könnte durch ein besseres Zeitverhalten oder aber durch Verwendung eines Pneumatiksystems mit höherem Nenndurchfluß erreicht werden.

Die **Stabilität der Bahnkurve** kann durch höhere Fertigungsgenauigkeiten des Maxwell'schen Rades und eine genauere Justiermöglichkeit der Aufhängung erreicht werden.

Eine Verringerung der **Energieverluste** wird durch entsprechend höhere Bahnstabilität erreicht oder durch Verwendung verlustarmer Führungselemente. Hierzu sei eine Führung durch entsprechend strömende Luft aus beispielsweise zwei längs der Radbahn verlaufenden regelmäßig durchbohrten Pneumatikschläuchen vorgeschlagen. Ähnliches kann auch analog durch entsprechende elektrische oder magnetische Felder erreicht werden.

13 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Demonstrationsobjekt zur Präsentation der Funktionsweise eines pneumatischen Aktuators entwickelt. Als Steuerungsaufgabe wurde das Konstanthalten der Maximalhöhe eines Yo-Yo-ähnlichen Objekts - eines Maxwell'schen Rades - durch den Aktuator gewählt.

Nach einer Einführung in die Historie des klassischen Yo-Yo's wurden grundlegende physikalische Betrachtungen von Energie und Kinetik des Maxwell'schen Rades angestellt. Es folgte eine Herleitung, wie die während des Durchlaufens seiner Bahnkurve auftretenden Energieverluste durch einen Aktuator ausgeglichen werden können.

Als Geber für die Momentanhöhe des Rades wurde ein Ultraschallsensor eingesetzt, dessen Kennlinie rechnergestützt vermessen wurde.

Nachfolgend wurde ein mechanischer Stativaufbau entwickelt, welcher neben der Aufhängemöglichkeit für Aktuator und Sensor eine effektive und einfach zu handhabende Möglichkeit der Justage bietet.

Als Stellglied wurde ein 3/2-Wegemagnetventil eingesetzt und die entsprechende Schaltung der eingesetzten Pneumatikkomponenten erläutert.

Für das Steuerungssystem kamen ein PC mit Datenerfassungskarte wie auch ein Microcontroller in Frage. Die Steuerung wurde mit beiden Systemen jeweils entwickelt und eingesetzt. Es wurde festgehalten, daß sich in Bezug auf den Versuchsaufbau keine Variante durch eine höhere Effektivität besonders hervorhob, sich jedoch der Microcontroller wesentlich besser für den Einsatz in einem portablen unabhängigen System eignete. Aus diesem Grunde bildete der Microcontroller die Grundlage für das Steuerungssystem der Endversion des Demonstrationsobjektes.

Abschließend wurde rechnergestützt die Bahnkurve des Maxwell'schen Rades in der fertigen Version des Versuchsaufbaus vermessen und analysiert. Hiervon ausgehend wurde die Gesamtfunktionalität der Anordnung beurteilt und für die kontinuierliche praktische Anwendung unter Voraussetzung einer robusten Faser für die bifilare Aufhängung des Maxwell'schen Rades als einsatzfähig befunden.

14 Literaturverzeichnis

- [1] Chou, Ching-Ping; Hannaford, Blake. *Measurement and Modeling of McKibben Artificial Muscles*. Seattle : Department of Electrical Engineering, FT-10, University of Washington, 2
- [2] Conrad Electronic GmbH, <<http://www.c-control.de>>
- [3] Drachenmanufaktur, <http://www.kitec.net/kitec/kitec_lines1.htm>
- [4] Drachenmanufaktur, <<http://www.kitec.net/technik.htm>>
- [5] Festo AG, Der Pneumatikkatalog
- [6] <http://www.andreas-gym.de/projekt/www/yoyo/his_bild.htm>
- [7] Kuypers, Friedhelm. 1990. *Klassische Mechanik : mit 84 Beispielen und 169 Aufgaben mit Lösungen*. Weinheim : VCH Verlagsgesellschaft mbH, 61-62
- [8] Pecori, Barbara <Pecori@gpxbof.df.unibo.it>; Torzo, Giacomo <Torzo@padova.infm.it>. „The Maxwell wheel investigated with MBL“ <<http://www.padova.infm.it/Torzo/YoYoTPT.pdf>>
- [9] Schulte, H. F. Jr. 1961. „The characteristics of the McKibben artificial muscle.“, The Application of external power in prosthetics and orthotics. National Academy of Sciences - National Research Council, Washington D.C.
- [10] Szabó, István. 1984. *Einführung in die technische Mechanik*. Berlin : Springer-Verlag, 263
- [11] National Instruments Corporation. 2000. *PCI-6023E User Manual*
- [12] Wegener-Sensortechnik, <<http://www.wegener-sensortechnik.de/us-sensoren.htm>>