

### 3. Entwurf eines Pendels

#### 3.1 Ermittlung der idealen Pendellänge

Über die Energieerhaltung kann man die Geschwindigkeit eines physikalischen Pendels in jedem Punkt bestimmen. Da sich die potentielle Energie, die das Pendel in der höchsten Lage im Stillstand hat, an jeder Position in einen Anteil kinetischer und potentieller Energie aufteilen läßt. Die potentielle Energie läßt sich leicht aus der Höhe und der Masse errechnen. In dem Fall des horizontalen Auftreffens ist die potentielle Energie am höchsten Punkt gleich der kinetischen Energie im tiefsten Punkt. Zu beachten ist, daß diese Berechnungen nur für dem Schwerpunkt gelten. Für jeden andern Punkt des Pendels müssen die Geschwindigkeiten linear umgerechnet werden.

Für das Pendel war keine zusätzliche Energiezufuhr vorgesehen, das bedeutet, daß es eine Höhe gibt, bis zu der das Pendel ausgelenkt werden muß, damit es eine bestimmte Geschwindigkeit im tiefsten Punkt erreicht wird. Da oberhalb der Pendelaufhängung ein Träger vorgesehen ist, kann das Pendel nicht um  $180^\circ$  ausgelenkt werden. Das Pendel sollte allerdings möglichst kurz werden, damit es steifer ist und das Gestell niedriger konstruiert werden kann. Den maximalen Auslenkwinkel habe ich mit  $130^\circ$  gewählt. Hieraus ergibt sich eine bestimmte Pendellänge, auf diese wird die gesamte Konstruktion ausgelegt. Später ist zu überprüfen, ob das Pendel wirklich um etwas mehr als  $130^\circ$  ausgelenkt werden kann, da geringe Reibverluste zu erwarten sind.

#### 3.2 Auswahl der Positionier- und Haltevorrichtung

Um das Pendel in der richtigen Position vor der Kopfstütze zu plazieren, muß das Pendel in Y- und Z-Richtung verfahrbar sein. Diese Positioniereinrichtung sollte nicht von Hand erfolgen, da dies vom Boden aus ohne Leiter nicht zu realisieren wäre.

Die bestehende Lösung, für die Positionierung in der Z-Richtung mit 2 Seilwinden, die von Hand synchronisiert werden, ist zwar finanziell relativ günstig, hat aber folgende Nachteile :

- die Führungen können verkanten
- es ist nicht zu gewährleisten, daß das Pendel immer waagrecht hängt.
- optisch erinnert es sofort an ein Sonderangebot aus dem Heimwerkerbaumarkt

Hierzu gibt es verschiedene Alternativen:

- Spindeltriebe:

Sie bestehen aus einer Spindel für jede Seite und sind entweder über eine Königswelle oder über einen Kabel synchronisiert. Sie werden von einem kleinen Drehstrom-Asynchronmotor und einem Untersetzungsgetriebe angetrieben. Auf der Motorwelle kann man einen Inkrementalwertgeber

anbringen. Dieser gibt an, wieviel Teile einer Umdrehung der Motor gedreht hat. Dies kann man über das Steigungsverhältnis der Spindel und der Getriebeübersetzung in einen Weg umrechnen. Für sehr genaue Positionierungen gibt es die Möglichkeit den Steigungsfehler der Spindel rechnerisch zu korrigieren. Damit man nach jedem Einschalten der Maschine nicht einen bestimmten Referenzpunkt anfahren muß, von dem an die Inkremente gezählt werden, kann man die Zählrichtung auch mit einem Speicher versehen, so weiß die Maschine beim Einschalten in welcher Position sie sich befunden hat. Die Motoren werden meist über einen Frequenzumrichter angesteuert. Es gibt viele Hersteller die Spindeltriebe inklusiv Steuerung und Auslegung anbieten. Die Preise sind meist sehr günstig.

- Linearmodule:

Sie sind meist auf einem Aluprofil mit ein oder zwei Linearführungen aufgebaut. Die Kraftübertragung erfolgt über eine Kugelrollspindel oder einen Riementrieb. Die beiden Linearmodule werden über eine Welle oder einen Kabel synchronisiert. Ansteuerung und Positionierung erfolgt ähnlich wie bei den Spindeltrieben. Diese Module gibt es in vielen verschiedenen Größen und sind ca. doppelt so teuer wie Spindeltriebe. Sie haben allerdings eine integrierte Führung und sind leicht zu montieren. Das ganze System ist voll gekapselt.

- Pneumatische und hydraulische Positioniereinrichtungen scheinen mir weniger geeignet.

Welches System verwendet wird, wird später entschieden. Ich habe die Konstruktion mit einem Linearmodul entworfen, Sollte das Budget zu knapp werden, hätte man dies leicht auf einen Spindeltrieb ändern können.

Für die Positionierung in Y-Richtung habe ich auch ein Linearmodul vorgesehen, da daran das Pendellager angebracht wird und dies möglichst spielfrei gelagert werden sollte.

### **3.3 Auswahl der Auslenkvorrichtung**

Das Pendel wird bei der alten Anlage mit einem langen Stab per Hand ausgelenkt und mit einem elektrischen Magneten in der oberen Position gehalten. Um das Pendel auszulösen wird der Strom zum Magneten unterbrochen. Bei diesem Prinzip bestehen einige Gefahrenquellen für das Bedienungspersonal, z.B. könnte der Stab vom Pendel abrutschen und es könnte sich bei einem Stromausfall lösen und einen Menschen verletzen.

Die Halteeinrichtung für das neue Pendel muß also so aufgebaut sein, daß sie ohne Strom das Pendel hält. Desweiteren sollte es möglich sein, das Pendel in verschiedenen Positionen zu halten, damit auch verschiedene Aufprallgeschwindigkeiten realisiert werden können. Für diese Anfor-

derungen war meiner Meinung nach eine Kupplung, die auf die Welle der Lagerung aufgeflanscht wird am geeignetsten.

Man kann das Pendel mit einem Pneumatikzylinder auslenken, dieser eignet sich allerdings weniger zum Positionieren. Man müßte den Pneumatikzylinder mit einem Seil verbinden, das auf einer Kurvenscheibe geführt wird. Die Kurvenscheibe wird mit einem geeigneten Freilauf mit der Welle verbunden.

Eine andere Alternative ist ein Drehstromasynchronmotor der an ein Planetengetriebe angeschlossen ist und das die Drehzahl auf ca. 1 bis 2 Umdrehungen pro Minute reduziert. Mit einem Frequenzumrichter und einem Inkrementalwertgeber auf der Motorwelle kann man eine bestimmte Pendelstellung anfahren und diese dann mit der Kupplung halten. Das Getriebe darf nicht starr mit der Welle verbunden sein. Es müssen 2 Zapfen gegeneinander drücken und kurz vor dem Lösen der Kupplung muß der Zapfen an der Getriebeausgangswelle an eine Stelle bewegt werden, an der er das Pendel beim durchschwingen nicht berührt. Dies könnte geschehen, indem er mehr als 2 mal  $130^\circ$  in die Bewegungsrichtung des Pendels gedreht würde.

Die Kupplung wird auch dazu eingesetzt, um das Pendel nach dem Rückstoß von der Kopfstütze festzuhalten, somit wird ein zweiter Aufschlag verhindert. Die Ansteuerung dieser Kupplung erfolgt über den Rechner.

### **3.4 Entwurf der Stahlkonstruktion**

Die lichte Breite des Pendels war im Lastenheft vorgegeben. Die Höhe der Pendelaufhängung ergibt sich aus der Pendellänge und aus der maximalen Aufschlaghöhe des Lastenheftes.

Das Pendel sollte von einer Seite frei zugänglich sein. Aus diesen Bedingungen habe ich das in Bild 5 gezeigte Pendelwerk gezeichnet.

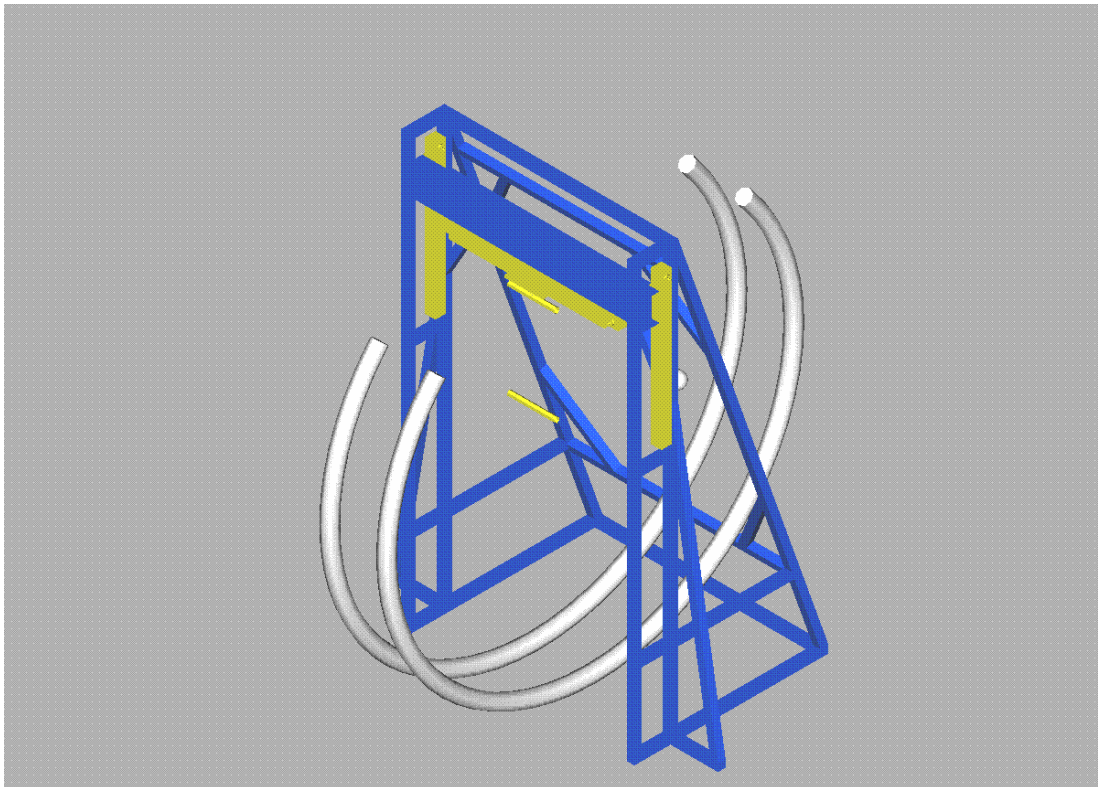


Bild 5

Die gelben Rechtecke sind die Linearmodule, die gelbe Welle, ist die Welle an der die Pendelstange befestigt würde. Die Welle ist in der höchsten und niedrigsten Position gezeichnet. Die Teilkreise beschreiben, den Weg, den der Prüfkörper in der mittleren unteren und in der rechten unteren Position zurücklegt. Quer vor den beiden Linearmodulen ist ein I-Profil angebracht, damit das darunter montierte Linearmodul eine sehr geringe Durchbiegung erfährt. Zusätzlich würde die große Masse einiges vom Stoß, der durch die Pendelstange in das Gestell übertragen wird, abfangen. Das Gestell ist aus einem 5mm Vierkantrrohr aufgebaut. Die beiden ersten Profile auf beiden Seiten dienen der Führung des I-Profiles. Die mittlere Querstrebe zwischen den beiden Profilen soll verhindern, daß das I-Profil weiter nach unten kann, z B. wenn die Spindel bricht oder der Riemen reißt.

Die 3 Rohre die im oberen Bereich quer von einer zur anderen Seite gehen und deren Querverstrebung sollen die Steifigkeit im oberen Bereich wesentlich erhöhen. Die Querrohre im mittleren Bereich sind in Tischhöhe und dienen zum einen als Begrenzung und zum anderen als Stabilisation. An den Profilen die auf dem Boden verlaufen sollen Winkel zur Befestigung am Boden angebracht werden. Die seitlichen Streben auf jeder Seite sollen die Steifigkeit in Y-Richtung erhöhen.

### 3.5 Ermittlung der Eigenfrequenz

Die Eigenfrequenz des Pendels wurde wie in Kapitel 5.9 beschrieben ermittelt. Sie lag bei 17 Hz, also noch niedriger als in Kapitel 2.3 geschätzt. Damit die Eigenfrequenz nicht mit in die Messung eingeht, sollte sie oberhalb der doppelten Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters, der für die Messungen eingesetzt wird liegen. Die Grenzfrequenz des CFC600 Tiefpaßfilters ist 600Hz. Demnach müßte die Eigenfrequenz des Pendels höher als 1.2 kHz sein. Wie man in Anhang 14.7 CFC600 ersehen kann, sind diese 1.2kHz noch in einem sehr ungünstigen Bereich der Filtercharakteristik. Hier kann man erkennen, daß man die Eigenfrequenz mindestens um den Faktor 100 erhöhen müßte.

### 3.6 Alternative Werkstoffe für die Pendelstange

Die Pendelstange des alten Pendels ist aus einem rechteckigen Stahlrohr 20x40x1,6mm. Dies ist ein sehr dünnwandiges Profil, welches in der Belastungsrichtung das höchste Trägheitsmoment hat. Das Profil ist also schon ganz gut gewählt. Um die Profile miteinander vergleichen zu können, habe ich für folgende Profile die maximale Durchbiegung, die maximale Zug-, Druckspannung und die maximale Lagerkraft errechnet ( Tabelle 1 ). Unter der Annahme, daß das eine Ende drehbar gelagert ist und das andere Ende mit 200g beschleunigt wird. Als Länge habe ich 2140mm angenommen.

Profil bez.	Werkstoff	E [N/mm <sup>2</sup> ]	m' [kg/m]	I <sub>x</sub> [mm <sup>4</sup> ]	W <sub>x</sub> [mm <sup>3</sup> ]
40x20x1,6	St37	210.000	1,380	34.300	1.720
50x2	AlMgSi0,5	70.000	0,814	87.010	3.480
40x20x2	AlMgSi0,5	70.000	0,605	44.460	2.223
50x20x2	AlMgSi0,5	70.000	0,713	78.550	3.142
H 23x60 ! x<->y	AlMgSi0,5	70.000	0,567	54.006	1.800
H 23x60	AlMgSi0,5	70.000	0,567	21.835	1.899
50x30x1,6	ST37	210.000	1,880	79.600	3.180
H60*60	AlMgSi0,5	70.000	2,295	507.083	16.903
60x3	AlMgSi0,5	70.000	1,450	218.800	7.293
60x5	AlMgSi0,5	70.000	2,222	329.400	10.980

	Um X-Achse			
	Sig <sub>vor</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Mb <sub>max</sub> [Nm]	f <sub>m</sub> [mm]	F <sub>A</sub> [N]
40x20x1,6	<b>462,12</b>	794,84	<b>51,43</b>	965,70
50x2	<b>134,72</b>	468,84	<b>35,87</b>	569,62
40x20x2	<b>156,75</b>	348,46	<b>52,18</b>	423,37
50x20x2	<b>130,70</b>	410,67	<b>34,81</b>	498,94
H 23x60 ! x<->y	<b>181,41</b>	326,58	<b>40,26</b>	396,78
H 23x60	<b>172,00</b>	326,58	<b>99,57</b>	396,78
50x30x1,6	<b>340,51</b>	1.082,83	<b>30,19</b>	1.315,59
H60*60	<b>78,20</b>	1.321,86	<b>17,35</b>	1.606,00
60x3	<b>114,52</b>	835,16	<b>25,41</b>	1.014,68
60x5	<b>116,56</b>	1.279,81	<b>25,87</b>	1.554,91

**Tabelle 1**

Wenn man das 40x20x1,6 mm Stahlprofil mit dem 40x20x2 Aluprofil vergleicht, sieht man, daß die Auflagerkräfte und die Spannungen bei dem Aluprofil deutlich geringer sind als bei dem Stahlprofil. Da sich auch hier wieder E-Modul und spezifische Dichte gegeneinander aufheben, ist die maximale Verformung bei beiden gleich. Der einzige Vorteil des Aluprofils ist, daß es weniger Lagerkräfte in das Gestell einleiten würde und damit dem mathematischen Pendel etwas näher wäre.

Das günstigste aus dieser Tabelle ist das Profil H60x60. Dieses Profil ist für den Belastungsfall ideal aufgebaut. Es hat wenig Material in der Nähe der Neutralenfasern und viel Material in einem großen Abstand zu ihr. Sieht man sich die Formeln zur Trägheitsberechnung an, so kann man dies auch rechnerisch bestätigen.

Das H60x60 Profil hat 1/3 der Durchbiegung des 40x20x1,6 Profils. Dies würde die das Quadrat der Eigenfrequenz verdreifachen. Die Eigenfrequenz eines Balkens, gemeint ist hiermit immer die Grundfrequenz, ist der

folgenden Formel proportional.  $f \propto \text{Const} * \sqrt{\frac{IE}{ml^3}}$  Const ist eine Konstante die

z.B. durch die Lagerung beeinflusst wird.

Würde man dieses Profil aus einem Werkstoff bauen der den selben E-Modul wie Stahl, aber nur das spezifische Gewicht von Alu hat, könnte man das Quadrat der Eigenfrequenz noch mal verdreifachen. Insgesamt könnte man so die Eigenfrequenz verdreifachen. Dies ist allerdings immer noch 1/30 der angestrebten Frequenz. Also kann ich sagen, daß es nicht möglich ist mit einem vertretbaren Aufwand eine Pendelstange mit einer ausreichend hohen Eigenfrequenz zu fertigen.

Ähnliche Ergebnisse gibt es auch, wenn man Faserverbundwerkstoffe, wie Kevlar oder Kohlefaser verwendet, wie sie im Radsport und im Wassersport eingesetzt werden. Bei diesen Werkstoffen kann man zwar die Steifigkeit des Rohrs durch die des Wickelverfahren beeinflussen, dies geht allerdings auch nur in gewissen Grenzen. Ein zusätzlicher Kostenpunkt wäre hier der Dorn gewesen, um den die Faser gewickelt wird (Formen, wie z.B. T-Profile sind nicht zu wickeln). Dieser Dorn müßte auf der gesamten Länge von gut 2m feinstbearbeitet sein. Die Hersteller, die Faserverbundrohre anbieten, hatten keinen Dorn dieser Größe. So hätten wir nicht nur die Rohre, sondern auch den Dorn bezahlen müssen.

Die Verbindungen dieser Faserverbundrohre werden geklebt, wobei die Haltbarkeit dieser Verbindung maßgeblich von dem Spaltmaß beeinflusst wird.

Auch Pendelstangen, die auf einem spannungsoptimierten Fachwerk basieren, waren für diesen Einsatzzweck nicht ideal, da sie aufwendig zu fertigen sind und man davon ausgehen muß, daß die Pendelstange beim Versuch beschädigt oder zerstört werden kann.

### **3.7 Zeitlicher Verlauf bis zur Genehmigung des CAR's**

Für alle Anschaffungen über 800 DM muß ein CAR ( Capital Appropriation Request ) erstellt werden. Dieser wird von verschiedenen Verantwortlichen im Headquater von Europa überprüft und unterschrieben. Sind alle Unterschriften aus dem Headquater von Europa auf dem CAR, wird dieser zu unserem Stammsitz in den USA geschickt und überprüft und unterschrieben.

Grundsätzlich müssen für die geplante Investition verschiedene Angebote eingeholt werden. Das günstigste ( nicht das billigste ) Angebot dient dem CAR als Grundlage. Für Investitionen dieser Größenordnung muß zusätzlich eine Investitionskostenrechnung erstellt werden.

In diese Investitionskostenrechnung geht der gesamte Anschaffungswert, die Wartungskosten, die Betriebskosten, Abschreibungsdauer, Abschreibungsverfahren ( hier linear ) und die Kostenersparnis ein. Diese Werte werden nach einem bestimmten Verfahren und unter Berücksichtigung des Steuersatzes miteinander linear verrechnet. Eine wesentliche Kennzahl bei diesen Berechnungen ist der Return on Invest. Diese Kennzahl gibt an, wie schnell sich die Investition durch zusätzliche Einnahmen oder durch Kostenersparnisse selbst finanziert hat. CAR's mit einem Return on Invest von mehr als 3 Jahren werden schon teilweise nicht genehmigt. Der Return on Invest unseres Versuchsstandes liegt bei ca. 0,7 Jahren.

Die Bestellungen können erst an den Lieferanten gegeben werden, wenn der CAR vollständig genehmigt worden ist. Um die mir zur Verfügung stehende Zeit optimal zu nutzen, habe ich zunächst alle erforderlichen Komponenten ermittelt und alle Lösungsansätze mit den Zulieferern besprochen. Für die praktikabelsten Lösungen habe ich Angebote angefordert. Viele Angaben für die Angebotserstellung mußten von mir überschläglich berechnet oder abgeschätzt werden, da ich noch keine vollständige Konstruktion hatte.

Die Angebote habe ich ausgewertet und die teuersten sinnvollen Angebote für den CAR zusammengestellt. Zusätzlich habe ich ein Angebot über ein Luftlager, von 5TDM mit in den CAR eingerechnet. Dieses Vorgehen ist zwar nicht vorgesehen, allerdings gibt es auch nicht die Möglichkeit 10TDM für Unvorhergesehenes einzuplanen, wie dies im Projektmanagement üblich ist. Das liegt daran, daß ein CAR für einen externen Auftrag gedacht ist und nicht für ein projektähnliches Vorgehen, wie bei dem Bau eines Versuchsstandes.

Während der Genehmigungsphase habe ich die Stahlkonstruktion mit 3D-Volumenkörpern erstellt. Nachdem ich meinen Kollegen die ersten Vorschläge zu einem linearen Prüfstand vorgelegt habe, waren sie von meinen Vorschlägen angetan, da diese völlig neue Variante viel praktischer und universeller ist, als ein klassisches Pendelschlagwerk. Nun habe ich mich zusätzlich um eine lineare Beschleunigungseinrichtung gekümmert. Parallel dazu habe ich nach alternativen Werkstoffen für die Pendelstange gesucht.

Um eine Entscheidungsgrundlage zu schaffen, ob ein Pendelschlagprüfstand oder ein linearer Prüfstand ( Funktionsprinzip des linearen Prüfstandes, siehe 5.Seite des Anhangs 14.8 - Der lineare Prüfstand -) zur Ausführung kommt, habe ich verschiedene Beschleunigungseinrichtungen miteinander verglichen. Die Lösung, die lineare Beschleunigung mit einem Pneumatikzylinder zu realisieren erschien mir vielversprechend, so daß ich beschloß, vorab einen geeigneten Pneumatikzylinder und ein schnelles Pneumatikventil zu bestellen. Dies war möglich, da jedes dieser Teile unter 800 DM kostete. Dieser Pneumatikzylinder wurde später zu meinem Prototypen modifiziert. Bis der CAR genehmigt war, habe ich die pneumatische Beschleunigungseinrichtung weiterentwickelt.

Nach dem der CAR durch diverse Faxgeräte fast bis zur Unkenntlichkeit verstümmelt wieder bei uns mit allen Unterschriften angekommen war, haben wir alle Komponenten, die wir für das H-Punkt-Pendel brauchen und die Teile, die wir für beide Pendel ( H-Punkt-Pendel und neuer Prüfstand ) benötigten, bestellt. Die anderen Teile konnte ich noch nicht ordern, da ich zunächst die Ergebnisse der Versuche mit dem Prototypen für die lineare Beschleunigungseinrichtung abwarten wollte. Erst dann konnte eine Entscheidung getroffen werden, wie der neue Prüfstand realisiert wird.

Diese Vorgehen war optimal, da die Zeit bis zur Genehmigung des CAR's vollständig genutzt werden konnte und somit der CAR frühestmöglich gestellt werden konnte.