

FRIEDRICH-PAULSEN-SCHULE NIEBÜLL

Facharbeit

Untersuchung eines
Schwungradspeichers mit
veränderbarem Trägheitsmoment

Autor: Thore Palzer

Klasse: 12p

Fach: Physik Profilseminar

Betreuende Lehrkraft: Lüder Reimers

Erstellzeitraum: Februar bis Juli 2025

Abgabedatum: 04. Juli 2025

4. Juli 2025

Abstrakt

Das Ziel dieser Arbeit ist zu überprüfen, wie sich die Trägheit eines rotierenden Körpers verhält, der in etwa mit der Hälfte seines Gewichtes an Wasser gefüllt ist. In dieser Arbeit wird dies anhand eines sogenannten „Taschendemonstrators“, eines Schwungradspeichers (im Folgenden Schwungradspeicher), überprüft. Dieser wurde uns von der Hochschule Flensburg zur Verfügung gestellt. Es soll überprüft werden, wie sich das Trägheitsmoment verändert, wenn die Bedingungen des Versuches verändert werden. Zum einen wurde die Größe dieses Schwungradspeichers variiert, ebenso das Gewicht, welches den Schwungradspeicher beschleunigte. Auch die Fallhöhe des Gewichtes wurde variiert. Besonders auffällig war der Einfluss der Größe. Vergleicht man die Effektivität eines 100% skalierten Schwungradspeichers mit der Effektivität eines 86% skalierten Schwungradspeichers, fällt auf, dass trotz der vergleichsweise kleinen Skalierung der originalgroße Schwungradspeicher ungefähr 110% effektiver war als der auf 86% skalierte. Ebenso war auffällig, wie sehr die verdoppelte Fallhöhe die Umdrehungsdauer verlängerte und somit auch die Effektivität enorm gesteigert hat. Ein weiterer Punkt, der besonders zu Beginn zu vielen nicht benutzbaren Messungen führte, ist das Aufrollen des Fadens, an dem das Gewicht hängt, mit dem der Schwungradspeicher beschleunigt wurde. Wurde dieser nicht gleichmäßig angebracht, war die gesamte Beschleunigungsphase unsauber und nicht wie erwartet eine Gerade.

Inhaltsverzeichnis

1	Physikalischer Hintergrund	4
2	Ziele und Umsetzung	9
3	Ergebnisse	13
4	Ausblick	19
5	Anhang	20

1 Physikalischer Hintergrund

Eine in der Physik immer wichtige Größe ist die Energie. Die kinetische Energie wird bei einem Schwungradspeicher durch folgende Formel beschrieben:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 \quad (1)$$

wobei J das Trägheitsmoment und ω die Winkelgeschwindigkeit beschreibt. Wobei für ω gilt $\omega = 2\pi f$. Eingesetzt in (1) liefert:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} J \cdot (2\pi f)^2 = 2\pi^2 J f^2 \quad (2)$$

Daran sieht man sofort, dass die Energie linear von dem Trägheitsmoment J und quadratisch von der Frequenz f abhängig ist.

Eine weitere wichtige Form der Energie ist die potentielle Energie, welche folgendermaßen beschrieben wird:

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h \quad (3)$$

Wenn das am Schwungradspeicher befestigte Gewicht fallen gelassen wird, gilt:

$$E_{\text{pot}} = E_{\text{kin}} \quad (4)$$

Da beim Abrollen des Seils der Weg h proportional zu den Umdrehungen N ist, gilt für h :

$$h = 2\pi r N$$

Eingesetzt in Gleichung (3) ergibt sich:

$$E_{\text{pot}} = mg(2\pi r N)$$

Da laut Gleichung (4) gilt, dass $E_{\text{kin}} = E_{\text{pot}}$, ergibt sich für die kinetische Energie:

$$E_{\text{kin}} = 2\pi mgr N$$

Da $2\pi mgr$ konstant ist, gilt:

$$E_{\text{kin}} \propto N \quad (5)$$

Also ist die kinetische Energie proportional zu den Umdrehungen N . Löst man nun Gleichung (4) nach ω^2 auf, ergibt sich:

$$\omega^2 = \frac{4\pi mgr}{J} \cdot N$$

1 Physikalischer Hintergrund

Setzt man nun $\omega = 2\pi f$ ein ergibt sich:

$$(2\pi f)^2 = \frac{4\pi mgr}{J} \cdot N \quad (6)$$

$$\Rightarrow f^2 = \left(\frac{mgr}{\pi J}\right) \cdot N \quad (7)$$

Also ist auch f^2 proportional zu N . Aus diesem Grund wird eine Gerade erwartet, sobald man f^2 über N aufträgt.

Das Trägheitsmoment J beschreibt allgemein die Massenträgheit eines Körpers. Hierbei gilt für eine Masse m mit dem Abstand r zur Rotationsachse

$$J = m \cdot r^2 \quad (8)$$

Eine Besonderheit dieses Schwungradspeichers im Vergleich zu traditionellen Schwungradspeichern ist, dass das Trägheitsmoment variabel ist. Dies liegt daran, dass sich die im Schwungradspeicher gelagerte Flüssigkeit unter Rotation vollständig in den äußeren Zylinder verlagert. Die Flüssigkeit befindet sich in Ruhe vollständig im inneren Zylinder, sofern der Schwungradspeicher mit Druck betrieben wird.

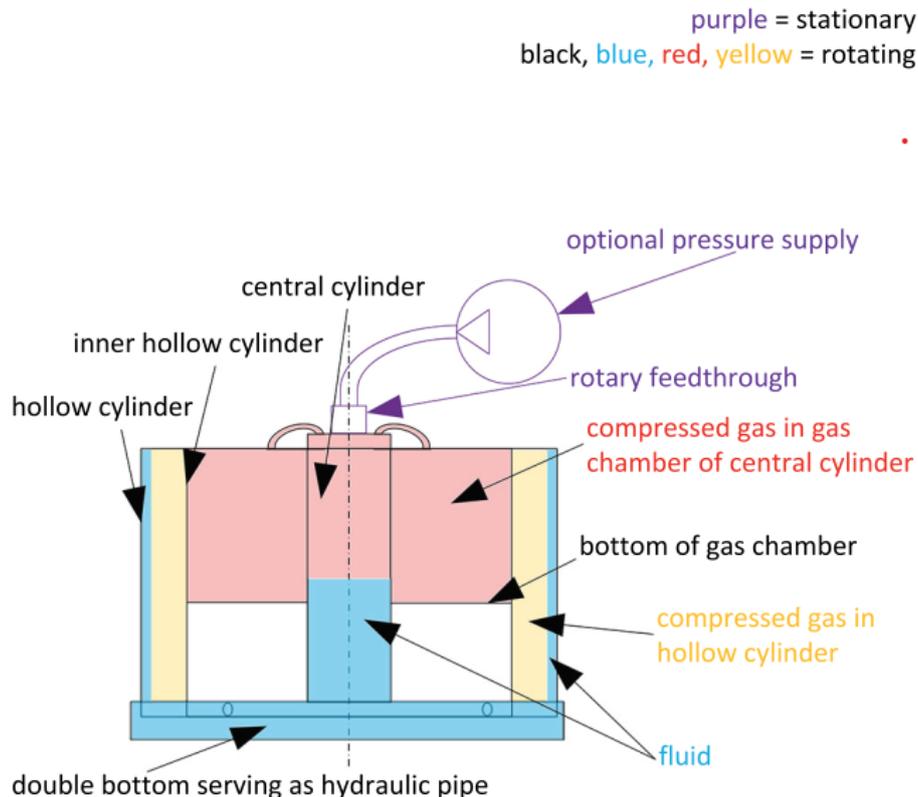


Abbildung 1: Aufbau des Schwungradspeichers. Quelle: PDF-Datei der Hochschule Flensburg, 2024

Ebenso wichtig zu beachten ist der Drehimpuls L , welcher stark mit dem Trägheitsmoment zusammenhängt. Dies zeigt sich in folgender Formel

1 Physikalischer Hintergrund

$$L = J \cdot \omega \quad (9)$$

Setzt man nun Gleichung (8) und $\omega = 2\pi f$ ein, ergibt sich:

$$L = m \cdot r^2 \cdot 2\pi f \quad (10)$$

Also führt eine Änderung des Trägheitsmoments bei konstanter Winkelgeschwindigkeit zu einer Änderung des Drehimpulses. Dies wiederum erzeugt ein Drehmoment T . Für dieses gilt:

$$T = \frac{dL}{dt} \quad (11)$$

Dies bedeutet, dass sich das Trägheitsmoment ändert, wenn sich die Flüssigkeit radial verschiebt, wodurch ein Drehmoment entsteht. Dies geschieht sogar, wenn die Drehzahl konstant bleibt. Das stellt einen erheblichen Vorteil gegenüber traditionellen Schwungradspeichern dar, bei denen eine Änderung der Drehzahl erforderlich ist.

Ebenso zentral ist die Zentrifugalkraft. Sie sorgt dafür, dass sich die Flüssigkeit nach außen bewegt und der Schwungradspeicher erst funktioniert. Die Zentrifugalkraft ist gegeben durch:

$$F_Z = m \cdot a \quad (12)$$

Mit $v = 2\pi f r$ und $a = (2\pi f)^2 r = \frac{v^2}{r}$ folgt:

$$F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (13)$$

Alternativ kann man auch schreiben

$$F_Z = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (14)$$

1 Physikalischer Hintergrund

Die Zentrifugalkraft sorgt dafür, dass sich das Fluid bei zunehmender Drehzahl weiter nach außen verschiebt. Dadurch rotiert ein größerer Teil der Masse auf einem größeren Radius, wodurch das Trägheitsmoment J steigt. Dies wiederum führt zu einem Anstieg der kinetischen Energie E_{kin} .

Die Wirkung der Zentrifugalkraft wird in der folgenden Abbildung veranschaulicht.

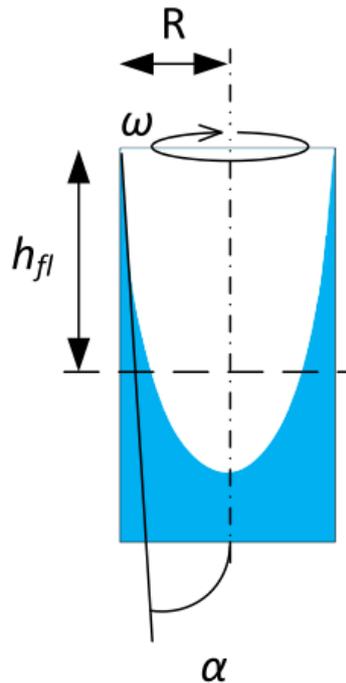


Abbildung 2: Wirkung der Zentrifugalkraft. Quelle: PDF-Datei der Hochschule Flensburg, 2024

Dabei gilt für den Winkel α folgende Gleichung:

$$\tan(\alpha) = \frac{\omega^2 \cdot r}{g}$$

mit $r \leq R$

Besonders interessant ist ebenso die Frage, welche Form von Reibung vorliegt. Um dies zu bestimmen muss die Winkelbeschleunigung α berechnet werden. Für die Winkelbeschleunigung α gilt:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = 2\pi \cdot \frac{df}{dt}$$

Trägt man in der Auswertung nun α über f^2 auf und sieht eine Gerade mit negativem y-Achsenabschnitt, so handelt es sich um Gleitreibung. Dies liegt daran, dass auch bei $f = 0$ Reibung existiert, was nur der Fall bei Gleitreibung ist.

1 Physikalischer Hintergrund

Durch die Betrachtung eines solchen Schwungradspeichers wird der enge Zusammenhang zwischen der kinetischen Energie, dem Trägheitsmoment und der Winkelgeschwindigkeit deutlich. Aus Gleichungen (1) und (2) geht hervor, dass die kinetische Energie linear vom Trägheitsmoment J und quadratisch von der Frequenz f abhängt. Durch die Wechselwirkung der potentiellen Energie des Gewichtes, die proportional zu den Umdrehungen N ist, zeigt sich, dass sowohl Energie als auch Frequenz im Quadrat linear mit den Umdrehungen wachsen.

Ebenso wichtig ist das variable Trägheitsmoment, welches durch die radiale Verschiebung des Fluids durch die Zentrifugalkraft entsteht. Die Zentrifugalkraft sorgt dabei dafür, dass sich die Masse auf größeren Radien verteilt, wodurch die kinetische Energie ansteigt, ohne dass dabei die Anzahl der Umdrehungen verändert werden muss.

Ebenso zentral ist der Drehimpuls $L = J \cdot \omega$. Dieser ist dabei eng mit den Energiegrößen verknüpft. Auch zeigt die Betrachtung der Winkelbeschleunigung ermöglicht es, die Reibungsform festzustellen. Hier wurde durch den negativen y-Achsenabschnitt Gleitreibung bestätigt.

2 Ziele und Umsetzung

Das Ziel der Arbeit ist es, das Verhalten eines rotierenden Körpers in Bezug auf das Trägheitsmoment zu untersuchen. Ein sehr wichtiges Ziel war es, die Beschleunigungsphase dieses Schwungradspeichers genau unter die Lupe zu nehmen. Wie in Gleichung (7) zu sehen, sagt die Theorie, dass die Beschleunigungsphase, sofern f^2 über N aufgetragen wird, von einer Geraden abweichen sollte, wenn sich das Trägheitsmoment verändert. Zu Beginn musste der Schwungradspeicher zunächst mittels eines 3D-Druckers gedruckt werden, da es sich um einen Schwungradspeicher handelt, den sich jeder mit einem geeigneten 3D-Drucker selbst drucken kann. Hier traten massive Probleme auf: Zum einen war es uns nicht möglich, den Schwungradspeicher in Originalgröße auf einem Ultimaker S3 zu drucken, obwohl dessen Druckvolumen ausreichend hätte sein müssen. Daher haben wir das Modell kleiner skaliert, sodass es auf den Ultimaker passte. Als wir den Druck starten wollten, trat das nächste Problem auf: Der Drucker begann zwar mit dem Druck, förderte jedoch zunächst kein Filament. Mehrfaches Entladen und Laden des Filaments sorgte zum Glück dafür, dass der Druck endlich starten konnte. Als nach mehreren Wochen endlich ein gedruckter Schwungradspeicher vor uns stand, folgte die nächste Überraschung: Die Teile passten trotz gleicher Skalierung nicht zusammen, weswegen wir den Käfig und auch den Kern an mehreren Stellen anschleifen mussten, was erneut mehrere Wochen in Anspruch nahm.



Abbildung 3: geschleifter Schwungradspeicher

Um zu überprüfen, inwiefern sich das Trägheitsmoment verändert, führte ich folgende Messung durch: Der Schwungradspeicher wurde auf einen Tisch gestellt und befestigt. Um den Schwungradspeicher zu beschleunigen, wurde ein Seil um den Hals der Magnethalterung – also den Kern des Schwungradspeichers – gewickelt. Dieses Seil wurde so

2 Ziele und Umsetzung

gewickelt, dass der Umfang jeder Umdrehung gleich ist. Das Seil habe ich mit sich selbst gekontert, um es zu befestigen..



Abbildung 4: Aufbau

Am diesem Seil wurden verschiedene Gewichte befestigt. Ich habe 500g sowie 1000g und 2000g getestet. In Abbildung 4 ist ein 2000g Gewicht zu sehen, welches sich auf dem Weg nach unten befindet und somit den Schwungradspeicher beschleunigt.

Um die Umdrehungen des Schwungradspeichers zu messen, nutzte ich Messgeräte und Software von Cassy. Ich nutze eine Lichtschranke, um die Umdrehungen N über der Zeit t darzustellen. Hierbei ist aufgefallen, dass die Messungen zunächst sehr ungenau wurden. Dies liegt daran, dass ich anfangs die Einstellung *Verdunklungen* wählte. Diese Einstellung hat das Problem, dass das Messintervall zu groß ist. Letztendlich habe ich die Einstellung *Ereignisse* gewählt. Hier konnte ich das Messintervall auf 2ms bei bis zu 300s Messzeit setzen. Auch längere Messzeiten waren möglich, für mich allerdings nicht notwendig. An dem oberen Ventil wurde zunächst ein Stück Filament befestigt, welches die Lichtschranke auslöste.



Abbildung 5: Erster Versuch, um Lichtschranke auszulösen

2 Ziele und Umsetzung

Hier trat allerdings das erste Problem auf: Die Auflösung der Messwerte war, besonders während der Beschleunigungsphase zu gering. Die Lücken zwischen den einzelnen Messwerten waren zu groß.

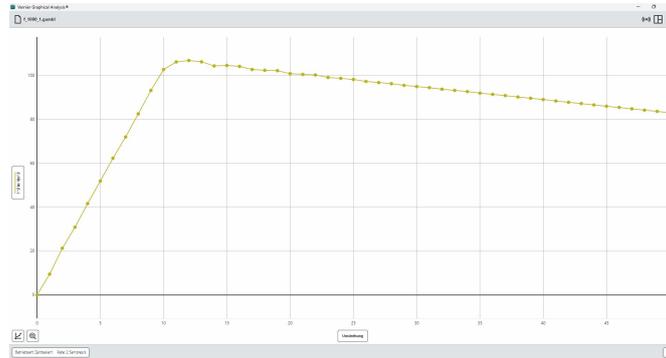


Abbildung 6: Probleme der Auflösung in der Beschleunigungsphase

Um dieses Problem zu lösen, besorgte ich mir Speichen eines Fahrradreifens. Diese wurde so angebracht, dass ich zwei Messwerte pro Umdrehung erhielt. Da aber auch diese Auflösung noch nicht genau genug war, musste ich mir eine neue Idee einfallen lassen. Zusammen mit meiner betreuenden Lehrkraft überlegte ich, was man machen könnte. Sie fand ein Speichenrad mit 8 Speichen, und somit auch 8 Messwerten pro Umdrehung, im Internet. Ich veränderte diese Datei anschließend so, dass es insgesamt 16 Speichen pro Umdrehung waren. Dadurch wurde die Auflösung der Beschleunigungsphase so stark verbessert, dass kein Raten über den Verlauf des Graphen mehr nötig war.

Als ich nun Messwerte hatte, ging es an die Auswertung. Zu Beginn schrieb ich ein einfaches Python-Programm, welches die Daten formatierte, so dass ich diese mit Vernier Graphical Analyses (im Folgenden Graphical) öffnen konnte. Ebenso wurde die Frequenz berechnet. Die ersten Messungen, auch wenn sie auf den ersten Blick gut aussahen, waren leider nicht zu gebrauchen, da wie oben bereits beschrieben und in Abbildung 6 zu sehen, ist die Auflösung der Messung zu gering. Dann kamen die Fahrradspeichen und das Programm musste angepasst werden: Die Werte der Umdrehungen mussten halbiert werden, die Berechnung der Frequenz angepasst werden und schon konnte man sich den Graphen in Graphical ansehen. Leider waren die Graphen alles andere als gut. Die Kurven wiesen, wie in Abbildung der folgenden Abbildung zu sehen, starke periodische Schwingungen auf.

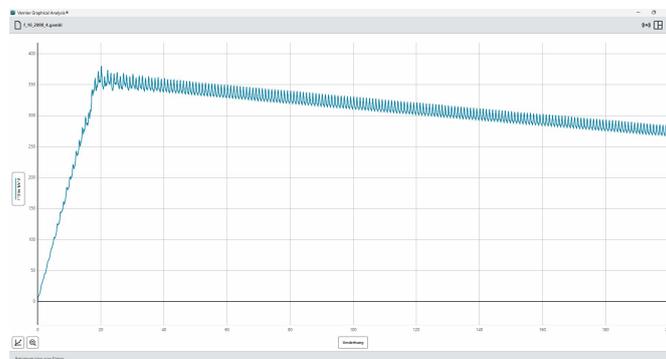


Abbildung 7: starke periodische Schwingungen

2 Ziele und Umsetzung

Aufgrund dessen war es uns aber möglich, ein weiteres Python-Programm zu schreiben, welches dafür sorgt, die Schwingungen ab dem Maximum zu korrigieren. Dies sieht man in Abbildung 8.

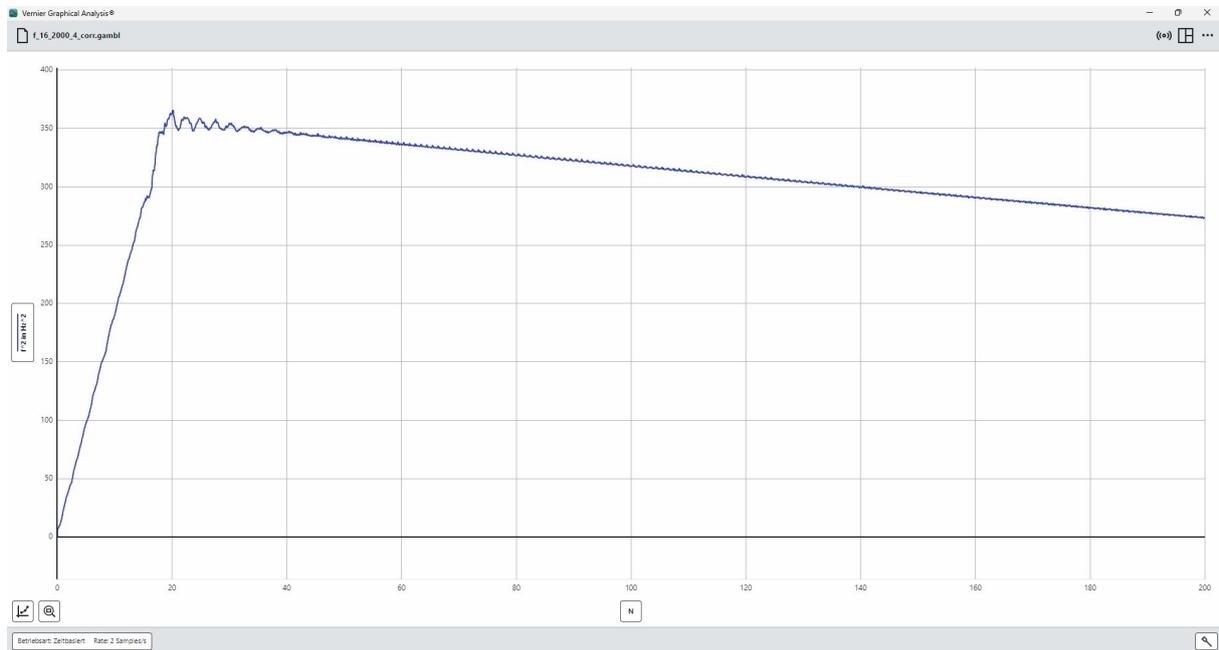


Abbildung 8: korrigierte Messung

Der Grund für die Schwingungen ist, dass der Abstand der Speichen nicht gleichmäßig war. Ob dies an dem 3D-Druck oder an dem Modell selbst liegt, ist noch unklar.

Nun hatten wir es geschafft, Messungen zu erstellen, welche nahezu perfekt korrigiert werden und hervorragend für die weitere Arbeit sind.

Eine Alternative Methode, die Messung durchzuführen, ist, dass man den Weg mittels eines weiteren Messgerätes aufnimmt. Dies hat den Vorteil, dass es keinen Einfluss hat, wie das Seil aufgewickelt ist, da der Weg hier, im Gegensatz zu vorher nicht aus den Umdrehungen ermittelt, sondern direkt gemessen wird. Hierbei trat allerdings ein altbekanntes Problem auf: Die Auflösung des Wegsensors war zu gering. Daraus resultiert, dass auch die Auflösung der Lichtschranke, unabhängig jeglicher Einstellungen und Speichenräder, zu gering ist. Dies liegt daran, dass Cassy sich nach dem größten Messintervall richtet. Dadurch fällt diese Methode, den Weg unabhängig von den Umdrehungen zu messen, trotz aller Vorteile, weg, da es nicht möglich ist, die Auflösung zu verbessern, was essenziell für die weitere Auswertung war.

Ein weiteres Ziel war es zu überprüfen, inwiefern sich ein solcher Schwungradspeicher für die Physikunterricht eignet. Dazu soll geprüft werden, wie einfach die Umsetzung gelingt und inwieweit das Ergebnis für Schüler sichtbar ist. Auch soll auf auftretende Probleme für Schulen hingewiesen werden.

3 Ergebnisse

Zunächst möchte ich auf die Umsetzbarkeit in Schulen eingehen: Ein Problem, welches direkt zu Beginn auftritt, sind die Kosten. Einen solchen Schwungradspeicher zu drucken kostet, wenn man nur die Kosten für das Filament betrachtet, bereits circa 10 Euro. Hinzu kommen noch Kosten für Autoventile und Kugellager. Insgesamt belaufen sich die Kosten eines Schwungradspeichers also auf 20 bis 30 Euro. Auch wenn dies zunächst gering erscheint, ergänzt man nun weitere Faktoren, wie die Effektivität, fällt auf, dass man als Schüler zu Beginn nicht viel mehr sieht, als ein Objekt, welches sich vergleichsweise lange im Kreis dreht. Ein weiteres Problem ist auch, dass es einige Zeit – meistens circa 10 Minuten – dauert, bis der Aufbau vollendet ist (Aufbau siehe Abbildung 4). Dies ist in Kombination mit den vergleichsweise hohen Kosten ein weiterer Nachteil. Ebenso gegen die Umsetzung in Schulen spricht, dass der Schwungradspeicher schnell undicht werden kann. Dies kann dazu führen, dass das Wasser aus dem Schwungradspeicher austritt und auf elektronische Geräte fließt, was zu Schäden führen kann.

Insgesamt komme ich also zu dem Schluss, dass zu aktuellem Stand ein solcher Schwungradspeicher nicht für die Umsetzung in Schulen geeignet ist.

Eine große Frage, die es zu untersuchen gab, ist die der Reibung. Wie in Abschnitt 1 bereits erläutert, wird Gleitreibung erwartet. Um dies zu untersuchen, wurden die Überlegungen aus der Theorie umgesetzt. Beim ersten Versuch waren die Ergebnisse allerdings sehr unsauber. Da die Unsauberkeit an einem Rauschen lag, nutzte man einen Tiefpassfilter, um das Rauschen zu reduzieren. Anschließend konnte man eine wunderbare Gerade erkennen, sobald man $\frac{df}{dt}$ über f_{tp} aufgetragen hat.

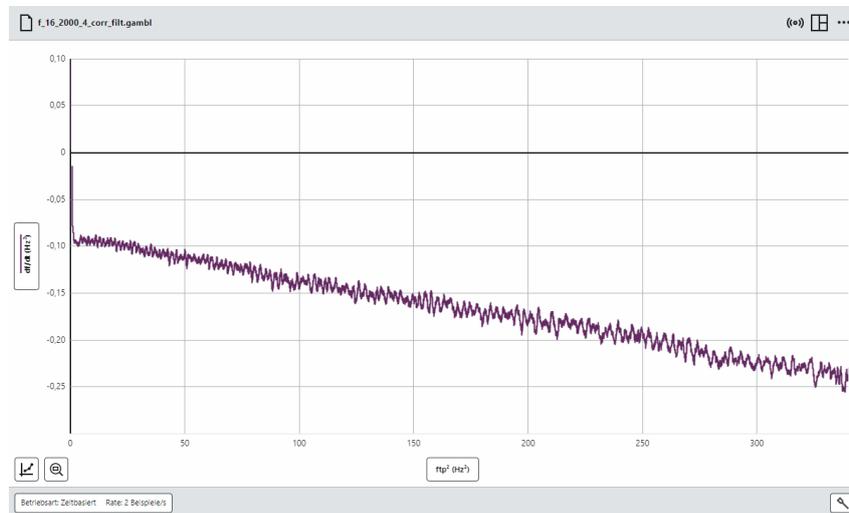


Abbildung 9: Reibung des Schwungradspeichers

$\frac{df}{dt}$ steht dabei für die Winkelbeschleunigung α und f_{tp} für die Frequenz f , nachdem diese durch den Tiefpassfilter gefiltert wurde. Hier sieht man, dass eine wunderbare Gerade mit negativem y-Achsenabschnitt zu sehen ist. Dies zeigt, dass es sich um Gleitreibung handelt und dass ein Luftwiderstand $\sim f^2$ handelt und nicht um eine Dämpfung proportional zu ω handelt.

3 Ergebnisse

Auch untersuchte ich, wie sich das Aufrollen des Fadens am Schwungradspeicher auswirkte. Der Unterschied, ob der Faden gleichmäßig oder ungleichmäßig aufgewickelt wurde war massiv.

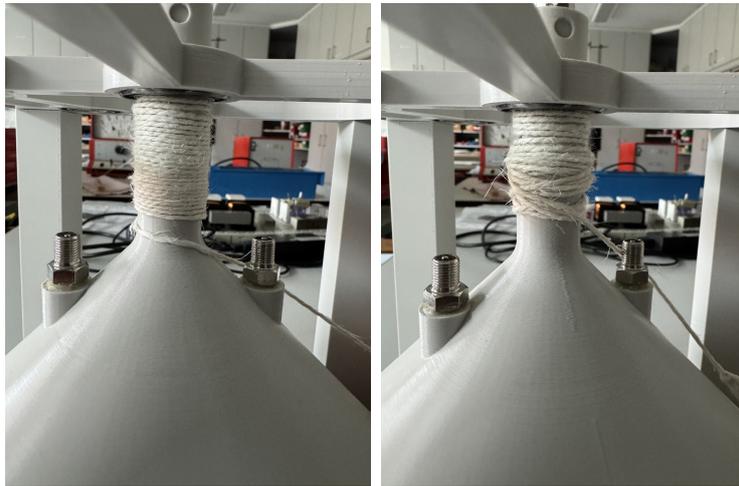


Abbildung 10: Das Seil einmal sauber (links) und einmal unsauber (rechts) aufgewickelt

Wurde der Faden nicht gleichmäßig aufgewickelt, so war die Beschleunigungsphase keine Gerade mehr, sondern sehr unsauber und eher wackelig.

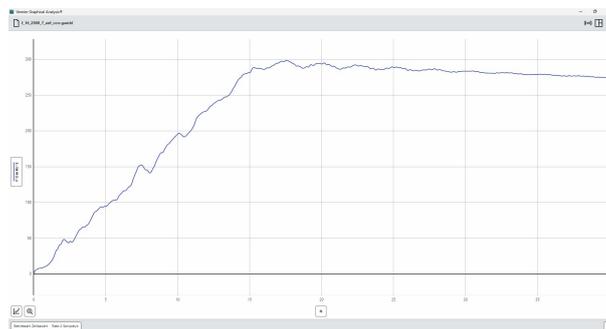


Abbildung 11: Das Seil wurde unsauber aufgewickelt

Hat man das Seil allerdings sorgfältig aufgewickelt, so ist die Beschleunigungsphase eine wunderbare Gerade ohne jegliche Unsauberkeiten.

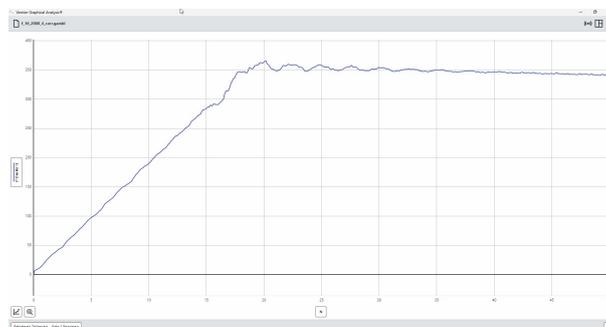


Abbildung 12: Ergebnis eines sauber aufgewickelten Seils

3 Ergebnisse

Dies lässt sich folgendermaßen begründen: Da wir über den Umdrehungen N f^2 aufgetragen haben, ist es wichtig, dass jede Umdrehung den gleichen Umfang hat. Dies liegt daran, dass wir den Umfang nicht weiter berücksichtigt haben und davon ausgegangen sind, dass dieser konstant ist. Wird dies Seil nun allerdings unsauber aufgewickelt, ist der Umfang nicht mehr konstant, weswegen die Messung verfälscht wird und die Beschleunigungsphase unsauber aussieht.

In Abbildung 12 zu sehen, ist der Graph zwischen 15 und 22 Umdrehungen nicht wie erwartet. Es wird eigentlich erwartet, dass nach der Beschleunigungsphase ein sauberer Übergang in die ausdrehende Phase folgt.

Dass bei uns eine solche Unsauberkeit zu sehen ist, kann mehrere Gründe haben: Wenn man das Seil mit einem kleinen Streifen Klebeband befestigt, kann dies genau der Moment sein, wo sich das Seil von dem Schwungradspeicher trennt. Dies erklärt allerdings nur, warum es zu einem Abfall der Beschleunigung kommt. Der Aufschwung lässt sich damit nicht begründen. Eine weitere Möglichkeit ist, dass das Seil keinen Halt mehr am Schwungradspeicher hat, deswegen rutscht, weswegen die Beschleunigung verringert wird. Später aber wieder Halt bekommt und somit auch die Beschleunigung verstärken würde, Dies wird voraussichtlich bei uns der Fall sein, da der Graph perfekt zu dem beschriebenen Phänomen passt. Ebenso spricht dafür, dass wir das Seil mit sich selbst gekontert haben, wodurch es möglich ist, dass das Seil den Halt verliert und es deswegen zu dem oben beschriebenen Phänomen kommt.

Die großen Schwankungen ab 20 Umdrehungen können wir uns folgendermaßen erklären: Der Schwungradspeicher wird mittels eines Gewichtes, in diesem Fall meist 2000g beschleunigt. Ab dem Moment, wo das Gewicht wegfällt, gerät der Schwungradspeicher in Schwingung, wodurch es zu diesen periodischen Schwingungen kommt. Dass die Schwingungen mit der Zeit (und somit auch den Umdrehungen) weniger werden, lässt sich auch leicht erklären: Mit der Zeit wurden die Schwingungen im Schwungradspeicher immer weniger, weswegen auch die Schwingungen im Graphen immer weniger werden, bis sich schlussendlich nicht mehr zu sehen sind, wie es die folgende Abbildung zeigt:

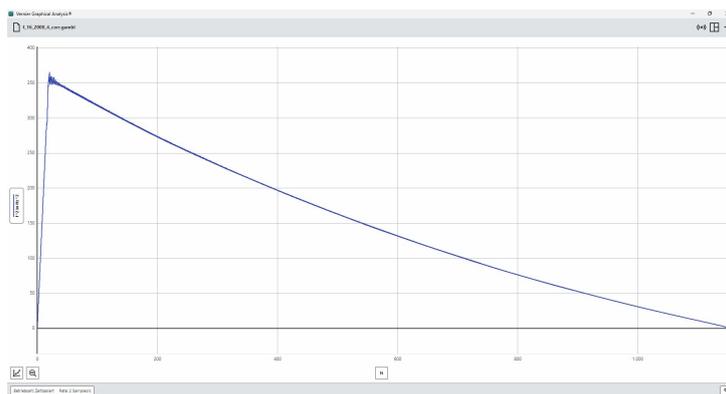


Abbildung 13: Die Schwingungen werden mit der Zeit immer weniger

Vergleicht man nun Theorie und Praxis sieht man gut, dass diese größtenteils übereinstimmen. Auch wenn es kleinere Abweichung gibt, haben die Graphen die meiste Zeit einen sehr vergleichbaren Verlauf.

Auch habe ich untersucht, wie sich die Frequenz f und die Umdrehungen N verändert haben, wenn man das Gewicht variiert.

3 Ergebnisse

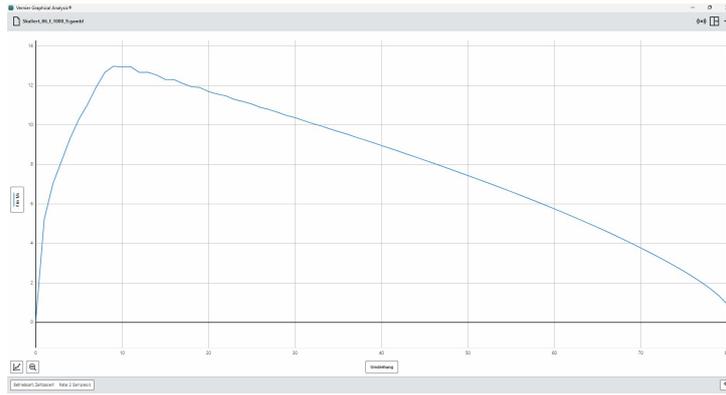


Abbildung 14: f über N für 1000g des auf 86% skalierten Schwungradspeichers

Wie in Abbildung 14 zu sehen, erreicht der Schwungradspeicher eine maximale Frequenz von $f_{\max} \approx 13\text{Hz}$ bei einem Gewicht von 1000g.

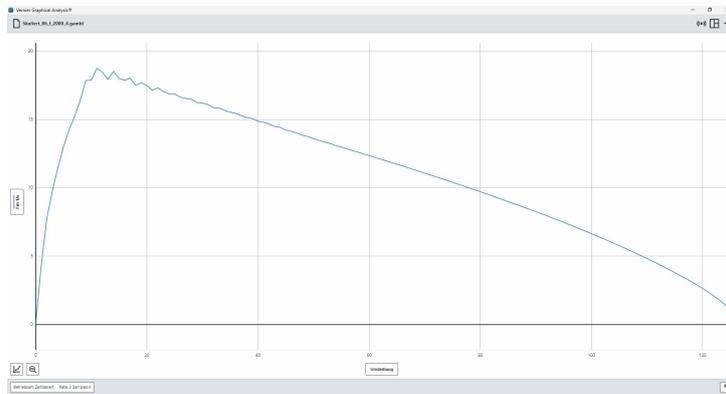


Abbildung 15: f über N für 2000g des auf 86% skalierten Schwungradspeichers

Schaut man nun auf Abbildung 15, sieht man, dass der Schwungradspeicher nun eine Frequenz von $f_{\max} \approx 18,5\text{Hz}$ erreicht. Dies entspricht einer Steigerung von 42,31%. Bei einer Verdoppelung des Gewichtes, erhöht sich die Frequenz also um 42,31%.

Daran sieht man, dass bei einem größeren Gewicht die Frequenz ansteigt, was das zu erwartende Verhalten bestätigt. Auch sieht man, dass eine Verdoppelung des Gewichtes nicht zu einer Verdoppelung der Frequenz führt. Dies zeigt, dass die Beziehung zwischen Gewicht und Frequenz nicht linear ist.

Verändert man nun nur die Fallhöhe des Gewichtes sieht man, wenn man die Frequenz betrachtet, sehr ähnliche Veränderungen wie bei der Veränderung des Gewichtes.

Die folgenden Abbildungen zeigen f^2 über N für die übliche Tischhöhe und für die doppelte Tischhöhe.

3 Ergebnisse

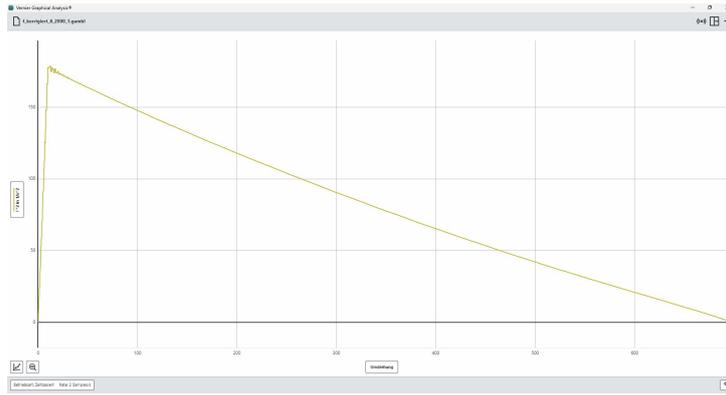


Abbildung 16: f^2 über N der normalen Tischhöhe

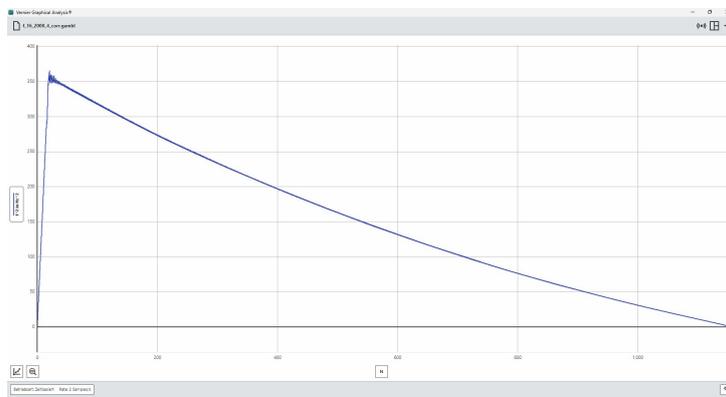


Abbildung 17: f^2 über N der doppelten Tischhöhe

Die normale Tischhöhe beschreibt hierbei die Höhe eines Tisches für Schüler im Physik-Raum meiner Schule. Die doppelte Tischhöhe beschreibt die normale Tischhöhe, auf welchen ein fast gleich hoher Tisch gestellt wurde.

Die maximale Amplitude beträgt bei der normalen Tischhöhe $f^2 = 178,5Hz^2$, was ungefähr einer Frequenz von $f \approx 13,36Hz$ entspricht. Schaut man nun auf die doppelte Tischhöhe, sieht man eine maximale Amplitude von $f^2 = 358,7Hz^2$. Daraus ergibt sich ungefähr eine Frequenz von $f \approx 18,94Hz$. Dies entspricht einer Vergrößerung von 41,77%. Schaut man nun darauf, wie sich die Anzahl Umdrehungen verhalten, wenn man die Fallhöhe des Gewichtes verdoppelt. Bei der üblichen Tischhöhe, kommt man auf fast 700 Umdrehungen N . Verdoppelt man nun die Tischhöhe kommt man auf ungefähr 1150 Umdrehungen N . Dies ist eine Steigerung von 64,29%.

Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass durch die Veränderung der Fallhöhe des Gewichtes die Ergebnisse der Versuches stark verändert werden. Auch zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bei der Veränderung des Gewichtes. Durch die Ergebnisse wird deutlich, dass sowohl die Frequenz f als auch die Umdrehungen N stark von der potentiellen Energie abhängen, welche hier durch die Fallhöhe und Masse des Gewichtes beeinflusst wird.

Ebenso interessant zu betrachten ist, wie sich der Schwungradspeicher verändert, wenn man dessen Größe skaliert. Um berechnen zu können, wie sich die Effektivität des Schwungradspeichers verändert, sobald man diesen in allen Dimensionen um einen Faktor s skaliert,

3 Ergebnisse

kann man folgende Formel nutzen:

$$\text{Vorteil} = \left(\frac{1}{s^5} - 1\right) \cdot 100\%$$

Hierbei ist s die Größe als Dezimalzahl

Diese Formel ergibt sich aus folgender Überlegung: Für die kinetische Energie gilt wie in Gleichung (1) gezeigt: $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}J \cdot \omega^2$. Da ω konstant ist, muss nur betrachtet werden, wie sich das Trägheitsmoment J verändert. Wie in Gleichung XX gilt für J : $J = m \cdot r^2$. Da in alle Dimensionen skaliert wird, wird die Masse m mit s^3 skaliert und der Radius r mit s . Eingesetzt ergibt sich:

$$J = s^3 \cdot s^2 = s^5 \quad (15)$$

Für den Effektivitätsvorteil gilt allgemein:

$$\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \cdot 100\%$$

Zusammen mit (15) ergibt sich für den Vorteil die obige Formel.

Vergleicht man nun einen auf 86% skalierten Schwungradspeicher, sieht man durch einsetzen in die Formel, dass der originalgroße Schwungradspeicher ungefähr 110% effektiver ist.

Vergleicht man ebenso die Umdrehungen N aus Abbildung 15 mit den Umdrehungen aus Abbildung 16, fällt auf, dass während der originalgroße Schwungradspeicher auf fast 700 Umdrehungen kommt, erreicht der auf 86% skalierte Schwungradspeicher lediglich etwas mehr als 120 Umdrehungen bei gleichen Messbedingungen. Dies entspricht einem Verlust von 580 Umdrehungen also ungefähr 82,66%.

Diese massive Abnahme der Umdrehungen sowie die Berechnung der Effektivität zeigen deutlich, dass es nicht sinnvoll ist, diesen Schwungradspeicher zu verkleinern, da es trotz dieser vergleichsweise kleinen Änderung der Größe bereits zu massiver Verschlechterung der Leistung kam.

4 Ausblick

Am Ende der Arbeit soll ein Ausblick gegeben werden, was in Zukunft noch untersucht werden kann und welche alternativen Methoden zum Durchführen der Messung es gibt. Zunächst möchte ich diskutieren, wie sich die Umsetzbarkeit in Schulen verbessern lässt. Dazu muss zunächst untersucht werden, wie sich der Schwungradspeicher verhält, wenn dieser mit Druck betrieben wird. Dort erwarten wir eine Abweichung der Gerade während der Beschleunigungsphase. Ist dies gegeben, muss man schauen, wie sich die Verschiebung des Fluides sichtbar machen lässt. Eine Idee ist, den Kern des Schwungradspeichers durchsichtig zu drucken und mit gefärbtem Wasser zu füllen. Dadurch erhoffe ich mir, dass die Schüler so gut sehen können, wie sich das Wasser verschiebt. Unter diesen Umständen bin ich der Meinung, dass sich ein solcher Schwungradspeicher gut für den Physikunterricht eignet, da so die Wirkung der Zentrifugalkraft verdeutlicht werden kann.

Einen weiteren offenen Punkt habe ich eben kurz angerissen: Es soll untersucht werden, wie sich der Schwungradspeicher verändert, wenn man diesen mit Druck betreibt. Sobald dieser mit Druck betrieben wird, erwarten wir in der Beschleunigungsphase eine Abweichung einer Geraden; Anhand welcher man erkennen kann, ob das Trägheitsmoment J größer oder kleiner ist, im Vergleich dazu, wenn der Schwungradspeicher ohne Druck betrieben wird. Dabei kann man auch prüfen, wie viel Druck für beste Ergebnisse notwendig ist. Vermutlich wird es der maximal mögliche Druck sein, also so viel Druck, bis fast alles an Wasser in den zentralen Zylinder verlagert ist. Auch kann man überprüfen, wie sich das Trägheitsmoment verändert, wenn weniger Druck im System ist und man kann überprüfen, wie viel Druck mindestens für einen sichtbaren Unterschied der Beschleunigungsphase notwendig ist. Daraus kann man dann schließen, wie lange man ein solches System betreiben kann, wenn es leicht an Druck verliert.

Auch kann man überprüfen, inwiefern man die Methode zu messen verbessern kann. Eine Idee dabei ist, sich das Induktionsgesetz zu nutzen machen. Dazu muss man an dem oberen Ende des Schwungradspeicher einen Magneten befestigen, sowie eine Spule mit Eisenkern. Diese müssen so dicht beieinander sein, dass eine Induktionsspannung erzeugt wird. Diese ließe sich dann messen und daraus kann man dann die Frequenz berechnen. Dies ist für alle Schulen eine Möglichkeit, die keine Lichtschranke zur Verfügung haben. Dabei kommt allerdings die Frage auf, ob die Auflösung mit einem Magneten hoch genug ist. Sollte dies nicht der Fall sein, könnte man mehrere Magnete an dem Schwungradspeicher befestigen. Dazu eignet sich das Speichenrad aus dem vorherigen Aufbau. Man müsste an jeder Speiche an der gleichen Position einen Magneten befestigen und anschließend das Programm zum Auswerten an die größere Anzahl an Speichen anpassen.

5 Anhang

Aufgrund der Dateigröße gibt es den Anhang nur digital. Folgende Dateien sind mit der Namenskonvention `f_u_g_a_corr.csv` im Anhang zu finden:

`f_16_2000_4.csv`
`f_16_2000_4_corr.csv`
`f_16_2000_7_anf_corr.csv`
`f_korrigiert_8_2000_1.csv`
`Skaliert_86_f_1000_9.csv`
`Skaliert_86_f_2000_4.csv`

Dabei steht `f` jeweils dafür, dass diese Datei die berechnete Frequenz enthält. `u` gibt die Anzahl der Messwerte pro Umdrehung an. Sofern nicht weiter angegeben gilt: `u = 1`. `g` gibt das Gewicht in Gramm an. `a` gibt die Nummer der Messung an und `corr` steht dabei für die korrigierte Version der Datei. Alternativ gibt es auch `korrigiert`, was gleichbedeutend ist. `Skaliert_86` bedeutet hier, dass der Schwungradspeicher auf 86% seiner Originalgröße skaliert wurde.