



Seminararbeit

Thema: Untersuchungen zur Newton Schaukel

Verfasser/in: Caroline Geier und Stephanie Geier

Leitfach: Physik

Seminarkürzel: 2Ph_W

Lehrkraft: StR Dr. Thomas Grillenbeck

Abgabe der schriftlichen Arbeit am:
Sekretariat]

[Datumsstempel

Präsentation mit Prüfungsgespräch am:
____.____.20____

Bewertung	Note	in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x 3	
Abschlusspräsentation				x 1	
Summe					
Gesamtleistung nach § 29 (7) GSO = Summe : 2 (gerundet)					

haltsverzeichnis

1 Einleitung.....	2
1.1 Beschreibung.....	2
1.2 Persönliches	2
1.3 Aktueller Forschungsstand	3
2 Ziele	4
3 Versuchsaufbau.....	4
4 Software	5
5 Experimente und Ergebnisse.....	5
5.1 Berechnung der Frequenz	6
5.2 Material der Aufhängung	7
5.2.1 Beschreibung.....	7
5.2.2 Ergebnisse	7
5.3 Anzahl der Kugeln.....	9
5.3.1 Beschreibung.....	9
5.3.2 Ergebnisse	9
5.4 Veränderung der Masse der ersten Kugel	12
5.4.1 Beschreibung.....	12
5.4.2 Ergebnisse	13
5.5 Material der Kugeln.....	17
5.5.1 Beschreibung.....	17
5.5.2 Ergebnisse	17
5.5.3 Diskussion und Erklärungsansatz zum Potenzgesetz	26
5.6 Versuchsdurchführung im Vakuum.....	26
6 Tracking-Programm.....	26
7 Eine Newton Schaukel mit Quanten	27
8 Abschließende Diskussion und Ausblick in die Zukunft	28
9 Zusammenfassung.....	29
10 Anhang	31
11 Abbildungsverzeichnis.....	32
12 Literaturverzeichnis.....	34
13 Danksagungen, Unterstützer	35

1 Einleitung

1.1 Beschreibung

Die „Newton Schaukel“ ist eine über Jahrhunderte erforschte Apparatur, deren physikalische Eigenschaften schon seit ihrer Erfindung Wissenschaftler begeistert und die bis heute unklare Aspekte aufweist.

Sie setzt sich typischerweise aus fünf Kugeln zusammen, welche normalerweise aus Metall bestehen und alle fünf ein gleiches Gewicht und eine gleiche Größe haben. Diese Kugeln sind mit gleichem Abstand und gleicher Höhe in einer Reihe aufgehängt, sodass sich die Kugeln im Stillstand gerade berühren. Die serielle Anordnung ergibt sich durch die bifilare Aufhängung an jeweils gleich langen Fäden; die bifilare Aufhängung reduziert die horizontale Auslenkung auf eine Dimension, eine vertikale Auslenkungsmöglichkeit ist wie bei jedem Fadenpendel selbstverständlich gegeben.

Vor der Gestaltung des im Allgemeinen als „Newton`s Cradle“ bekannten seriellen Kugelstoßpendels in Form handlicher Gestelle erforschte der niederländische Wissenschaftler Christiaan Huygens das Verhalten von zwei aufgehängten Massen. Auch Isaak Newton wandte sich dieser Fragestellung zu. Seine Ursprünge findet das serielle Kugelstoßpendel im 17. Jahrhundert, als der französische Physiker Abbé Mariotte dieses System baute und analysierte. Heute wird die „Newton Schaukel“ auch in Filmen als Symbol für Wissen und hohe Bildung verwendet.

1.2 Persönliches

Die Idee, mit dem Newton`s Cradle zu arbeiten, kam ursprünglich vom Physikwettbewerb GYPT (German Young Physics Tournament), bei dem im Jahr 2019 eine Aufgabe wie folgt lautete:

„The oscillations of a Newton`s cradle will gradually decay until the spheres come to rest. Investigate how the rate of decay of a Newton`s cradle depends on relevant parameters such as the number, material, and alignment of the spheres.

Diese Aufgabe bearbeiteten wir und hatten die Möglichkeit, sowohl beim Bundeswettbewerb GYPT im März 2019 in Bad Honnef, als auch beim Regionalwettbewerb Jugend forscht in Rosenheim unsere Ergebnisse vorzustellen. Nach diesen zwei Wettbewerben legten wir unsere Versuche jedoch nicht beiseite, sondern arbeiteten weiter daran, da wir viele Fragestellungen interessant fanden.

1.3 Aktueller Forschungsstand

In vielen Schulen wird das Newton`s Cradle verwendet, um Energie- und Impulserhaltung zu demonstrieren. Es ist aber wissenschaftlich unzureichend, den Kugelkettenmechanismus nur durch Energie- und Impulserhaltung zu erklären. Dies wurde schon durch die deutschen Forscher F. Herrmann und P. Schmälzle 1980 und von F. Herrmann und M. Seitz 1982 untersucht.^{1,2} S. Hutzler, G. Delaney u.a. legten auf Grund dieser Experimente und Überlegungen 2004 ein ComputermodeLL vor.³ Ein weiteres Computermodell stellte Werner Maurer 2011 im Rahmen der Systemphysik vor.⁴

Auch die Jugend forscht Arbeit von Simon Huppertz und Kristof Heck zeigt unter anderem, dass Energie- und Impulserhaltung unzureichend für die Erklärung des Mechanismus der Newton Schaukel sind.⁵ Eine sehr interessante Arbeit legten Tang, Kao u.a vor.⁶ Sie bauten eine Newton Schaukel mit Quanten. Dazu arbeiteten sie bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt (Bose-Einstein-Kondensat). Deren Ergebnisse werden wir später noch mit unseren Daten vergleichen.

¹Herrmann 1980

² Herrmann 1982

³ Hutzler 2004

⁴ Maurer 2011

⁵ Huppertz 2014, S. 3f

⁶ Tang 2018

2 Ziele

In verschiedenen Experimenten wollen wir untersuchen, welchen Einfluss die Veränderung des Materials der Aufhängung der Kugeln, ebenso wie die Parameter Kugelanzahl, Material der Kugeln, Luftreibung und Masse der ersten Kugel haben. Außerdem stellt sich uns die Frage, ob ein modernes Tracking-Programm sinnvolle Messungen und Auswertungen bei einer Versuchsanordnung wie der eines seriellen Kugelstoßpendels liefert.

3 Versuchsaufbau

Für unsere folgenden Versuche benutzen wir ein handelsübliches Kugelstoßpendel (Ailibhaus), bei dem wir jeweils einen Parameter für die verschiedenen Betrachtungen änderten.



Abb. 1: eine typische Newton Schaukel.

Die Masse der Kugeln dieses Pendels beträgt 0,047 kg und die Kugeln haben einen Durchmesser von 0,022 m. Die maximale vertikale Distanz zwischen Kugel und oberem Gestänge h_g beträgt 0,130 m und als Auslenkungshöhe verwendeten wir h_a sind 0,110 m. Die effektive Fadenlänge beträgt also $0,130\text{m} + \frac{0,022}{2}\text{m} = 0,141\text{m}$.

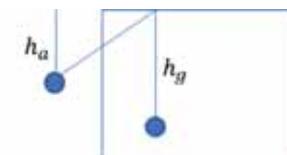


Abb. 2: Grundstruktur.

4 Software

Als Software zur sequenziellen frameanalytischen Messung verwendeten wir das wissenschaftliche Tracking-Programm „Tracker Video Analysis und Modeling Tool“ von Douglas Brown in der Version 5.0.6 von August 2018, welches ein Projekt von „Open Source Physics“ ist und von comPADRE (Compadre Academy, Tempe, Arizona) gehostet wird. Dieses ist in Versionen für Windows, Mac OS X, Linux 32-bit und Linux 64-bit verfügbar und wird im Folgenden kurz Tracker genannt. Aufgabe von Tracker ist es, eine Videoaufnahme eines physikalischen Experimentes auf Einzel-Bildebene als Zeitreihe unter bestimmten Gesichtspunkten zu analysieren bzw. dreidimensional (zwei Raumdimensionen und eine Zeitdimension) zu vermessen.

5 Experimente und Ergebnisse

Zunächst bauten wir mit Fischertechnik eine Startvorrichtung, sodass eine einheitliche Anfangshöhe bei verschiedenen Versuchen möglich war. Diese Startvorrichtung kann zwischen den zwei metallenen Schienen weggezogen werden und minimiert somit sowohl vertikale als auch horizontale Schwankungen während eines Startvorgangs.

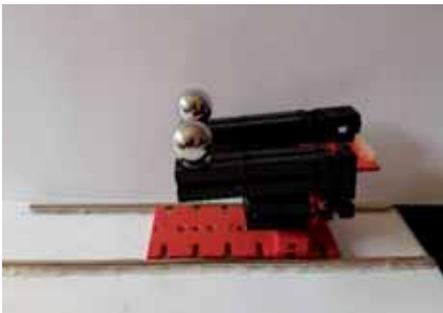


Abb. 3: Startvorrichtung.

Unsere Versuche filmten wir mit der Handykamera des Handys Samsung Galaxy 9+. Wir probierten zunächst auch andere Kameras aus, jedoch hatte nur die Kamera des Handys Samsung Galaxy 9+ die notwendigen Einstellungen und Kameraeigenheiten, um Videos zu machen, die man sinnvoll auswerten konnte.

5.1 Berechnung der Frequenz

Ein Faden-Einzelpendel kann sinnvoll als mathematisches Pendel betrachtet werden; auch das bifilare System der Newton Schaukel kann abstrahiert sinnvoll als Pendel mit harmonischer Schwingung gesehen werden. Für solch ein Pendel gelten die Formeln:^{7,8}

Eigenfrequenz f_0 :
$$f_0 = 1/(2\pi) \sqrt{\frac{g}{l}}$$

mit g = Erdbeschleunigung und l = Abstand zwischen dem Drehpunkt und dem Kugelmittelpunkt. In unserem Fall ist l die in Abb. 2 eingeführte Größe $h_a = 0,130\text{m}$ addiert mit dem Radius der Kugel $r = 0,011\text{m}$.

Für die Periodendauer T einer harmonischen Schwingung ergibt sich:

Periodendauer T_0 :
$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Die Frequenz f_{ged} eines gedämpften, physikalischen Pendels mit d als Dämpfungsfaktor berechnet sich nach:⁷

Frequenz mit Dämpfung:
$$f_{ged} = \sqrt{f_0^2 - d^2}$$

Wir erwarten also bei unseren Versuchen eine etwas kleinere Frequenz als nach

$f_0 = 1/2\pi \sqrt{\frac{g}{l}}$ errechnet werden kann, da pro einer Schwingung Energie verloren geht.

Mit dem von uns gemessenen bzw. errechneten Wert $l = 0,141\text{m}$ und mit

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ergibt sich für f_0 :

$$f_0 = 1/2\pi \sqrt{\frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,141\text{m}}} = 0,159 \sqrt{69,57 \cdot \frac{1}{\text{s}^2}} = 1,328 \text{ Hz.}$$

Der per Hand ermittelte Wert von $f_{experimentell} = f_{ged} = 1,29 \text{ Hz}$ ist tatsächlich etwas geringer als $f_0 = 1,328 \text{ Hz}$. Auch die Fourieranalyse unserer Daten durch Tracker errechnet im Mittel den selben Wert. Da bei keinem unserer Versuche ein Wert von f vorliegt, der größer als f_0 ist, gehen wir davon aus, dass unsere Messwerte

⁷ Trautwein 1983³, S. 97ff

⁸ Meschede (Hrsg.) 2015²⁵, S. 218f

valide sind. Auch bei einer Veränderung des Materials der Kugeln (siehe Kapitel 5.5) verändert sich der Wert $f_{\text{experimentell}}$ der Frequenz nicht, er ist also nicht von der Masse abhängig.

5.2 Material der Aufhängung

5.2.1 Beschreibung

Zunächst planten wir, selbst ein Newton's Cradle zu konstruieren. Dazu verwendeten wir Metallkugeln mit 18 mm Durchmesser und einer Masse von 0,025 kg. Unsere Aufhänger waren aus Plastik und mit Heißkleber fixiert.

5.2.2 Ergebnisse

Bei dem Versuch, ein Newton's Cradle selbst zu bauen, trat ein Problem auf. Normalerweise schwingen bei einem Newton's Cradle zu Beginn für längere Zeit fast ausschließlich die erste Kugel und die fünfte Kugel abwechselnd, während die drei mittleren Kugeln nahezu still stehen. Zu Beginn haben also nur die erste und fünfte Kugel eine große Auslenkung. Erst nach geraumer Zeit schwingen alle fünf Kugeln synchron hin und her. Keine Kugel besitzt mehr eine Eigenschwingung. Bei unserem selbstgebauten Newton's Cradle trat jedoch ein anderes Schwingungsverhältnis auf. Der Zeitraum, in dem nur die erste und fünfte Kugel stark ausgelenkt werden, verkleinerte sich. Somit trat der Zeitpunkt, ab welchem die fünf Kugeln einheitlich als ein Pendel schwingen, um ein Vielfaches früher ein als bei einem gekauften Newton's Cradle. Nach Überlegungen stellten wir die Hypothese auf, dass unsere Fixierung der Aufhängung das Problem war. Denn der Heißkleber, mit dem wir kleine Plastikröhrchen an die Metallkugeln klebten, um die Kugeln mit einem Nylonfaden aufzuhängen (s. Abb. 4 und Abb. 5), ist um einiges biegsamer als die Fixierung bei einem gekauften Newton's Cradle. Bei diesem sind die Aufhängung ebenso wie die Kugeln einheitlich aus Metall gefertigt. Wir kamen also zu dem

Schluss, dass das Material der Aufhängung eine bedeutende Auswirkung auf das Schwingungsverhalten eines Newton`s Cradle hat.



Abb. 4: Metallkugeln ohne Aufhängung.



Abb. 5: Aufgehängte Metallkugeln.

Um unsere These zu bestätigen, bauten wir ein weiteres Newton`s Cradle, dieses Mal benutzten wir jedoch Metallkugeln, die zusätzlich eine Metallaufhängung hatten (entsprechend Abb. 6). Dieses zweite selbstgebaute Newton`s Cradle verhielt sich vom Schwingungsverhalten genauso wie die gekaufte Newton Schaukel. Somit wird unsere These unterstützt, dass die Veränderung des Schwingungsverhaltens nicht an Faktoren wie z. B. der Ungenauigkeit durch das eigene Konstruieren hervorgerufen wird, sondern wirklich durch das Material der Aufhängung und Fixierung beeinflusst wird und, dass eine zu elastische Aufhängung dazu führt, dass der Zeitpunkt, an dem alle fünf Kugeln einheitlich schwingen, früher auftritt. Metall eignet sich z. B. gut als Fixierung, während Heißkleber und Plastikröhrchen sich suboptimal auf das Schwingungsverhalten der Newton Schaukel auswirken.



Abb. 6: Metallkugeln mit Aufhängung.

Für weitere Versuche nutzten wir jedoch das professionelle System aus Abb. 1. Denn so ermöglichen wir es, dass unsere Versuche und Ergebnisse leicht repliziert und wissenschaftlich überprüft werden können.

5.3 Anzahl der Kugeln

5.3.1 Beschreibung

Wir führten verschiedene Versuche durch, bei denen die Anfangshöhe der Auslenkung, der Durchmesser der Kugeln, das Material der Kugeln und die Fadenlänge gleich blieben. Wir veränderten jedoch die Anzahl der schwingenden Kugeln. Zunächst ließen wir nur eine Kugel schwingen, das nächste Experiment setzte sich aus zwei Kugeln zusammen, bei dem wir die erste Kugel auslenkten und diese dann auf die zweite Kugel auftreffen ließen. Diese Vorgehensweise kam bei weiteren Versuchen zur Anwendung: Versuche mit drei Kugeln, vier Kugeln und fünf Kugeln, bei denen wir wieder jeweils die erste Kugel auslenkten. In allen Versuchsvarianten ließen wir die Kugeln bis zum Stillstand auspendeln. Die Videos dieser Versuche werteten wir dann mit Tracker aus. Dazu trackten wir jeweils die verschiedenen Kugeln. Wie in Abb. 1 erkennbar, versahen wir jede zu trackende Kugel mit einem Farbpunkt. So stellten wir sicher, dass Tracker jeweils den selben Punkt trackte und die Schablone nicht verschob.

5.3.2 Ergebnisse

Wir untersuchten die Auslenkung der Kugeln. Den Ursprung des Koordinatensystems legten wir bei dieser Versuchsreihe an die Stelle, an der der Faden der ersten Kugel am Gestell festgebunden ist. In den Diagrammen (Abb. 7 und Abb. 8) beschreibt die y-Achse den x-Wert in Metern (horizontale Auslenkung) und die x-Achse die Zeit in Sekunden. Blau ist die erste Kugel, rosa die zweite, orange die dritte, grün die vierte Kugel und rot die fünfte Kugel.

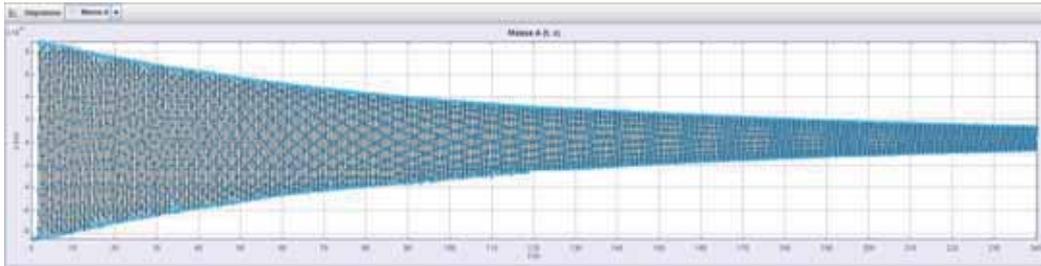


Abb. 7: Tracker-Diagramm für eine Kugel, somit ein einfaches Fadenpendel.

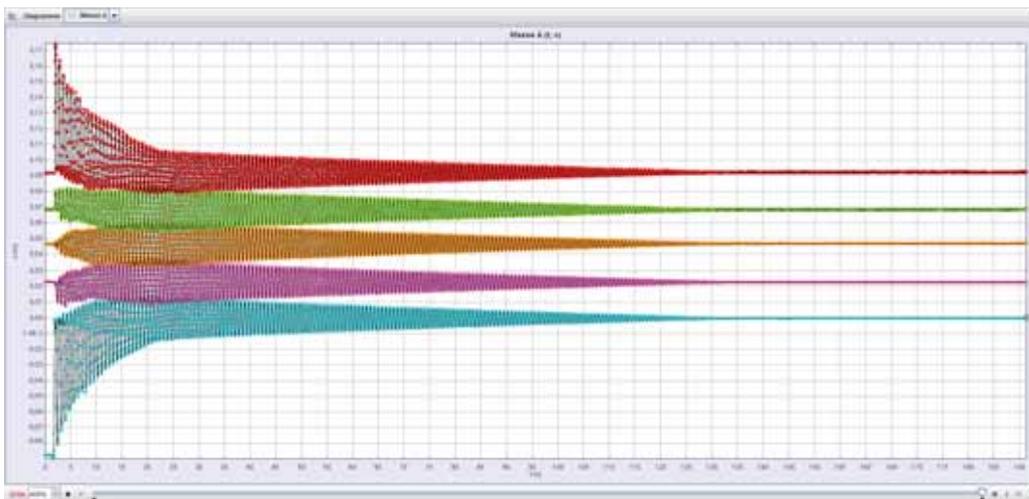


Abb. 8: Tracker-Diagramm für fünf Kugeln, also eine typische Newton Schaukel.

Da die Diagramme der Versuche mit zwei, drei und vier Kugeln vom Grundverlauf ähnlich aussehen, haben wir diese Diagramme hier nicht abgebildet (sie sind jedoch im Anhang vorhanden). Das Entscheidende kann man schon an diesen zwei Diagrammen gut sehen: Das Pendel schwingt im Gesamten weniger lang, wenn man mehr Kugeln verwendet. Wenn man den zeitlichen Verlauf der Schwingungen der Kugeln betrachtet, kann man erkennen, dass bei dem Versuch mit fünf Kugeln schon nach 130 s keine Bewegung mehr vorhanden ist. Bei dem Versuch mit einer Kugel bewegt sich das Pendel jedoch bei 230 s noch deutlich. Zu dem Ergebnis, dass sich durch eine zunehmende Anzahl an Kugeln die Schwingungsdauer verkürzt, kommt man auch, wenn man die y-Auslenkung, also die vertikale Auslenkung der ersten Kugel, betrachtet.

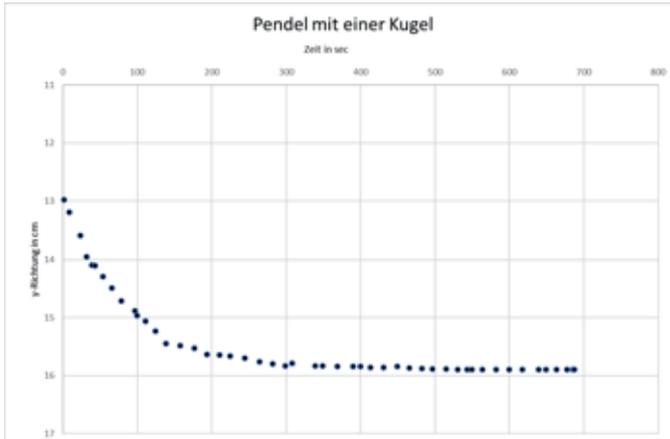


Abb. 9: Abnahme der Auslenkung der ersten Kugel bei einem bifilaren Fadenpendel. Die y-Achse zeigt die y-Auslenkung in cm, die x-Achse die Zeit in s.

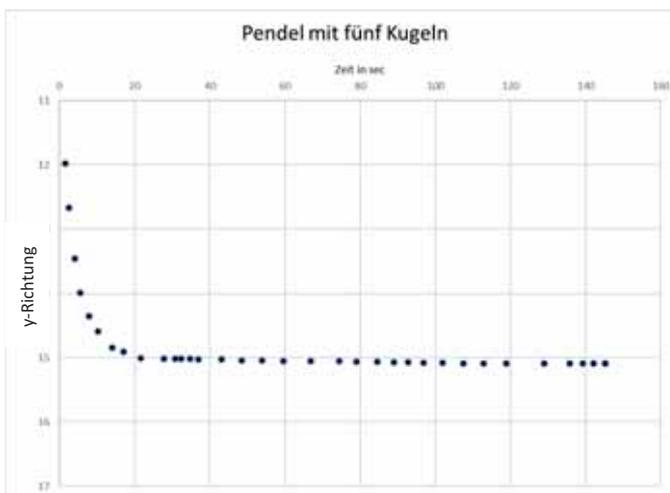


Abb. 10: Abnahme der Auslenkung der ersten Kugel bei einem typischen Newton's Cradle mit fünf Kugeln. Die y-Achse zeigt die y-Auslenkung in cm, die x-Achse die Zeit in s.

Die y-Achse zeigt die vertikale Auslenkung der ersten Kugel, die x-Achse die Zeit in Sekunden.

Während bei dem Versuch mit einer Kugel noch bis 400 s eine deutliche Abnahme der y-Auslenkung zu sehen ist, zeigt sich die viel kürzere Schwingungsdauer der ersten Kugel in Abb. 10. Denn die Hüllkurve der Kugel zeigt, dass schon bei 40 s die vertikale Bewegung nahezu Null ist. Wenn man nun die Hüllkurven der ersten Kugel aller fünf Versuche vergleicht (in Abb. 11 dargestellt), lässt sich noch einmal sehr gut erkennen, dass mit zunehmender Kugelzahl das Abklingen der Pendelschwingungen stärker bzw. größer wird. Auffallend ist außerdem, dass der Versuch mit vier Kugeln etwas aus dem Rahmen fällt, da die Phase, in welcher die erste Kugel eine hohe vertikale Auslenkung erfährt, länger ist als bei den

Teilversuchen mit zwei und drei Kugeln. Eine Vermutung von uns ist, dass aufgrund der geraden Anzahl der Kugeln das Verhalten etwas von den anderen Experimenten abweicht.

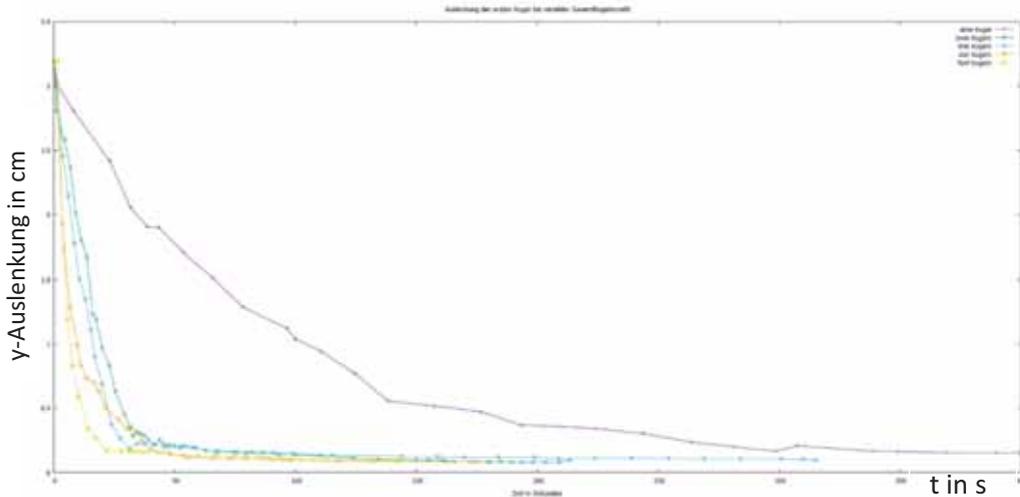


Abb. 11: Hüllkurven der y -Auslenkung der ersten Kugel bei variabler Gesamtkugelnanzahl: violett der Versuch mit einer Kugel, grün mit zwei, blau mit drei, orange mit vier und gelb mit fünf Kugeln.

5.4 Veränderung der Masse der ersten Kugel

5.4.1 Beschreibung

In einem weiteren Versuchsaufbau verglichen wir die Ergebnisse von zwei unterschiedlichen Versuchen. Zunächst lenkten wir die ersten beiden Kugeln aus und ließen diese auf die drei stillstehenden Kugeln auftreffen. Im Vergleichsversuch ersetzten wir die ersten beiden Kugeln durch eine Metallkugel mit doppelter Masse, hatten also nur noch vier Kugeln in die Newton Schaukel integriert, mit der Besonderheit, dass die erste Kugel doppelt so schwer war wie die anderen drei Kugeln.

5.4.2 Ergebnisse

Im Versuch, bei welchem statt einer einzigen Kugel zwei Kugeln (erste und zweite Kugel) auf die verbliebenen drei Kugeln aufprallen, werden auf der gegenüberliegenden Seite ebenfalls zwei Kugeln (vierte und fünfte Kugel) ausgelenkt. Hier scheint der Impulserhaltungssatz bestätigt. Dabei gilt:

$$m_1 + m_2 = m_4 + m_5$$

mit

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5$$

und

$$v_1 = v_2 = v_4 = v_5$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_4 v_4 + m_5 v_5$$

$$m_1 v_1 + m_1 v_1 = m_4 v_4 + m_4 v_4$$

$$2 (m_1 v_1) = 2 (m_4 v_4)$$

$$m_1 v_1 = m_4 v_4$$

Wenn man beim Newton's Cradle die beiden ersten Kugeln durch eine Kugel mit doppelter Masse ersetzt, so ergibt sich keine Schwingung, wie man sie vielleicht erwarten würde. Eine einfache, zunächst plausibel klingende Annahme wäre, dass aufgrund der verdoppelten Masse der ersten Kugel auf der gegenüberliegenden Seite zwei Kugeln (dritte und vierte Kugel), welche die halbe Masse der ersten Kugel besitzen, ausgelenkt werden.

Dieses angenommene Phänomen könnte allein der Impulserhaltungssatz und der Energieerhaltungssatz erklären.

Bei dem neuen Experiment gilt:

$$m_{1,neu} = m_1 + m_2$$

Der Impulserhaltungssatz besagt:

$$m_{1,neu} v_{1,neu} = m_3 v_3 + m_4 v_4$$

$$(m_1 + m_2) v_{1,neu} = m_3 v_3 + m_4 v_4$$

$$m_1 v_{1,neu} + m_2 v_{1,neu} = m_3 v_3 + m_4 v_4$$

$$2 (v_{1,neu}) = v_3 + v_4$$

Als Folge des Stoßes der neuen ersten Kugel müssten also die beiden Kugeln drei und vier mit jeweils der halben Geschwindigkeit der ersten Kugel ausgelenkt werden. Bei der Durchführung dieses Experiments zeigt sich jedoch, dass statt zwei Kugeln mit jeweils halb so großer Geschwindigkeit mehrere Kugeln mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausgelenkt werden. Es ergibt sich keine geordnete, gemeinsame Auslenkung der dritten und vierten Kugel. Somit reicht der Impulserhaltungssatz nicht aus, um dieses Phänomen zu erklären. Nach Überlegungen schlossen wir uns der Erklärungstheorie des an der Züricher Fachhochschule unterrichtenden Professors für Physik Werner Maurer an. Die Auslenkung der fünften Kugel bei der üblichen Newton Schaukel mit fünf Kugeln lässt sich so erklären: Wenn die erste Kugel auf die anderen vier Kugeln auftrifft, besitzt sie einen bestimmten Impuls. Dieser wird mit Schallgeschwindigkeit (5850 m/s) durch die anderen Kugeln weitergegeben. Sobald das Signal an der letzten Kugel (fünfte Kugel) landet, besteht keine Möglichkeit mehr zur Weitergabe des Impulses. Die fünfte Kugel wird ausgelenkt und geht nach oben.

Prallen zwei Kugeln (die erste und zweite) auf die verbliebenen drei Kugeln, wird der doppelte Impuls weitergegeben. Dieser ist jedoch nicht einheitlich, sondern besteht aus zwei einzelnen Impulspaketen. Diese gehen hintereinander durch die Kugeln hindurch und bleiben in den beiden letzten Kugeln hängen. Das Impulspaket der zweiten Kugel, welches als erstes bei der fünften Kugel auftrifft, passt in diese Kugel und „füllt“ sie. Das zweite Impulspaket der ersten Kugel bleibt in der vierten Kugel hängen, da die fünfte Kugel schon „voll“ ist. Zwei Kugeln werden ausgelenkt. Die beiden Impulspakete passen also jeweils in die letzten beiden Kugeln (vierte und fünfte).⁹

Empirisch ist dies im Tracker-Diagramm zu unseren Experimenten in Abb. 12 wiedergegeben. Die Symmetrie der Kurvenverläufe ist deutlich zu erkennen.

⁹ Maurer, a. a. O.

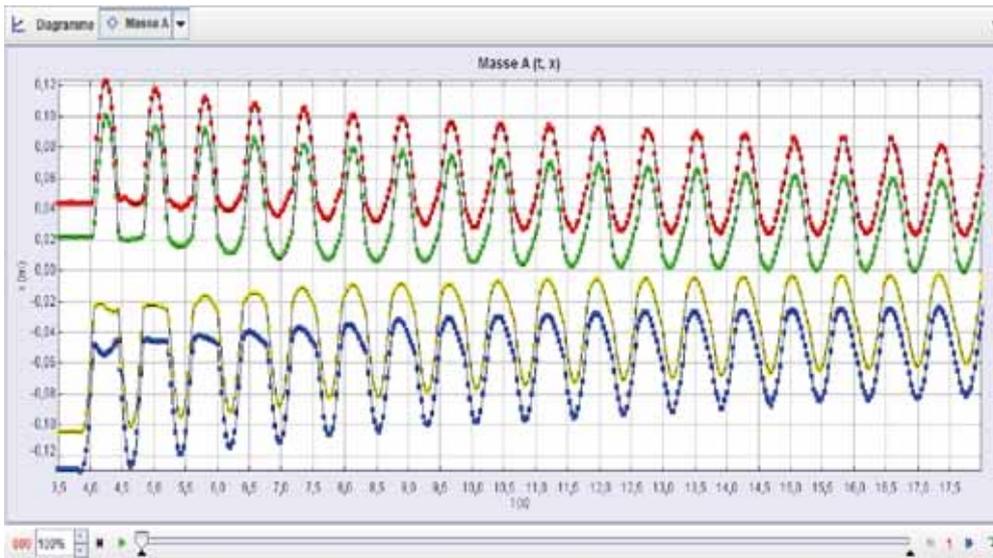


Abb. 12: Tracker-Diagramm der x-Achse einer Newton Schaukel, bei der die beiden ersten Kugeln gemeinsam starten. Die mittlere Kugel ist nicht eingezeichnet. Startkugeln sind die erste Kugel (blau) und die zweite Kugel (gelb).

Verändert man den Versuch jedoch so, dass statt der ersten und zweiten Kugel eine doppelt so schwere Kugel auf die anderen drei Kugeln aufprallt, wird dieses Impulssignal zwar auch durch die Kugeln hindurchgegeben, passt jedoch nicht in die letzte hinein und es kommt zu einer unkontrollierten Auslenkung.¹⁰

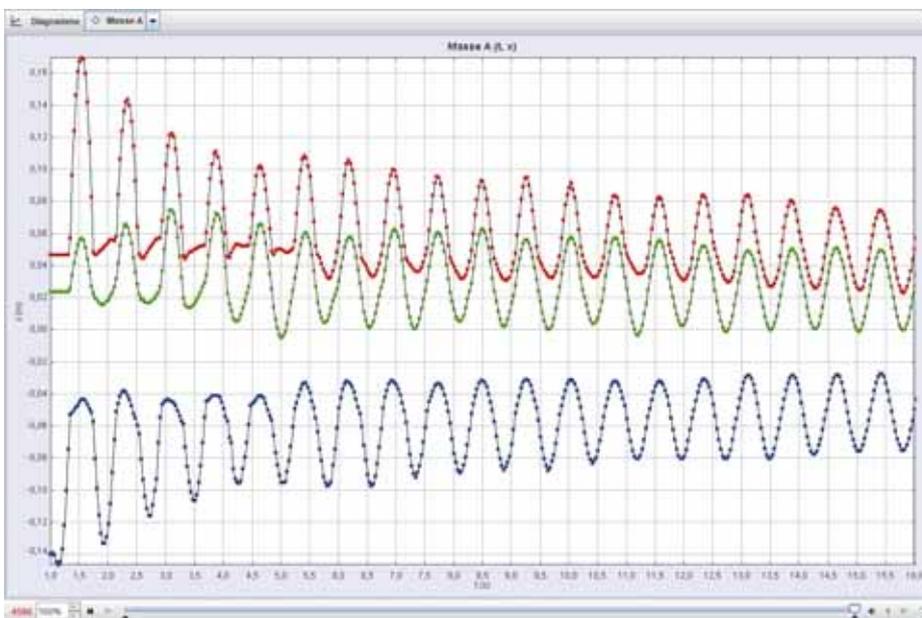


Abb. 13: Newton Schaukel mit einer Kugel doppelter Masse als Startkugel (blau), die mittlere Kugel ist nicht dargestellt. Die ungleiche Auslenkung der zwei letzten Kugeln zu Beginn (grün und rot) ist gut zu sehen.

¹⁰ Maurer, a. a. O.

Dies lässt sich auch mit einer anderen Überlegung, dem Bruch der Translations-Symmetrie im Sinne von Emmy Noether, erklären.^{11,12,13}

Meschede beschreibt das Noether–Theorem wie folgt: „Wenn die Energiefunktion invariant gegen eine gewisse Transformation ist, d. h. die Naturgesetze symmetrisch im Hinblick auf eine solche Transformation sind, entspricht das dem Erhaltungssatz für eine bestimmte Größe“¹⁴. Abb. 14 beweist das oben algebraisch ausgeführte geometrisch: Bei der typischen Newton Schaukel mit fünf gleichgroßen Kugeln gleichen Materials und sich gerade berührender bifilaren Aufhängung ist die Translations-Symmetrie nach Emmy Noether gegeben. Verwendet man allerdings eine doppelt so große Kugel desselben Materials, so verändert sich der Radius um den Faktor $2^{1/3} \approx 1,26$ (und nicht 2). Daraus ergibt sich schon der Grund der Translations-Asymmetrie.

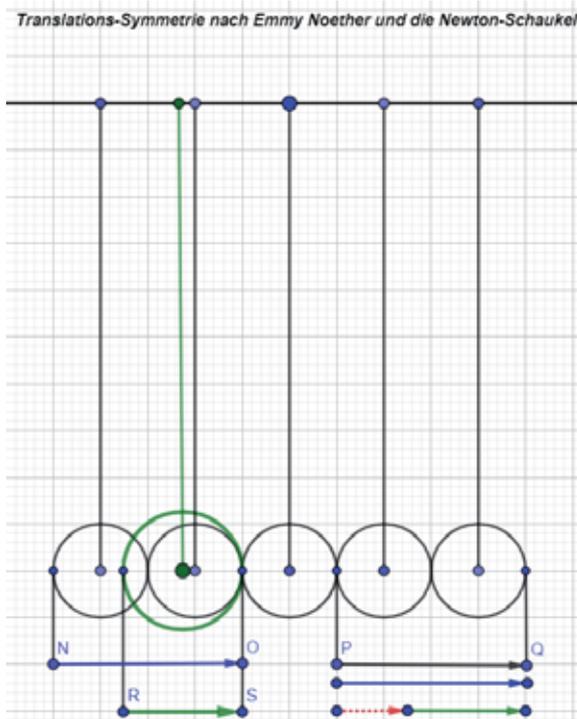


Abb. 14: Translations-Symmetrie im Sinne von Emmy Noether und Brechung dieser bei einer Kugel mit doppelter Masse (grün). Der rote Vektor quantifiziert die Brechung der Translations-Symmetrie. Die Translations-Symmetrie steht im Zusammenhang mit der Impulserhaltung und ist nicht gegeben, sofern man die beiden rechten Kugeln als systemäquivalent zur großen grünen Kugel betrachtet.

¹¹ Olver 2015

¹² Lincoln 2018

¹³ Noether, Emmy 1918

¹⁴ Meschede (Hrsg.) 2015²⁵, S. 40

5.5 Material der Kugeln

5.5.1 Beschreibung

Im nächsten Versuchsaufbau blieben wir nun bei der typischen Anzahl von fünf Kugeln, veränderten aber das Material. Der eine Teilversuch setzte sich aus Metallkugeln zusammen, der andere aus Plastikkugeln (Mixture of methacrylic acid esters and photoinitiator). Um eine identische Größe der Plastikkugeln im Vergleich zu den Metallkugeln zu gewährleisten und somit qualitative Aussagen beim Vergleichen der beiden Teilversuche machen zu können, benutzten wir einen 3D Drucker, den uns netterweise Herr Rolf-Dieter Klein (Tätigkeiten als Entwickler, derzeit unter anderem externer Projektberater des Projekts CUBE-SAT MOVE 2 am Institut für Raumfahrtwissenschaft an der TU München) zur Verfügung stellte. Um die Versuche gut vergleichen zu können, ist es jedoch sinnvoll, zunächst einen genaueren Blick auf die Unterschiede zwischen dem Schwingungsverhalten eines Newton's Cradle mit einer Kugel und dem typischen Newton's Cradle mit fünf Kugeln zu werfen.



Abb. 15: Newton's Cradle mit Plastikkugeln.

5.5.2 Ergebnisse

Zunächst ließen wir die Newton Schaukel mit Metallkugeln - jedoch reduziert auf eine Kugel, sodass sich ein einfaches Fadenpendel ergab - bis zum Stillstand auspendeln. Die Ergebnisse des Fadenpendels verglichen wir anschließend mit einem Versuchsaufbau, in dem die typische Newton Schaukel mit fünf Metallkugeln auschwang.

Die y -Auslenkung der Kugel bei einem einfachen Fadenpendel folgt einer Exponentialfunktion. Bei einem einfachen Fadenpendel schwingt eine Kugel, ohne durch Stöße mit anderen Kugeln Energie - wie bei dem Newton's Cradle - einzubüßen. Der Energieverlust geschieht hier kontinuierlich, da ununterbrochen Energie durch Reibung in Wärme umgewandelt wird. Dass das Schwingungsmuster eines Fadenpendels mit einer Exponentialfunktion beschrieben werden kann, stimmt also mit unserer Erwartung und der allgemeinen Forschung überein. Diese Theorie lässt sich jedoch nicht auf ein Newton's Cradle übertragen.

Bei der Auswertung der Daten eines Newton's Cradles mit fünf Kugeln fiel uns auf, dass das Schwingungsverhalten der ersten Kugel sinnvoll in drei Phasen eingeteilt werden sollte, um relevante Ergebnisse zu erkennen.

So beschreiben wir den Zeitraum, in welchem lediglich die erste und fünfte Kugel eine hohe vertikale Auslenkung besitzen, und die restlichen Kugeln zwei, drei und vier sich nahezu im Stillstand befinden, als Phase 1. Als Phase 2 wird der Zeitraum bezeichnet, in welchem sich alle Kugeln gut sichtbar bewegen, jedoch noch nicht als eine Einheit, sondern etwas ungeordnet und unkontrolliert. Diese Phase bezeichnen wir auch als Übergangsphase von Phase 1 zu Phase 3, da sich die Kugeln drei und vier den Kugeln eins und fünf immer weiter annähern, bis diese im Einklang schwingen. Ab dem Zeitpunkt, an dem es keine Stöße mehr gibt, die dazu führen, dass einzelne Kugeln ausgelenkt werden, also alle fünf Kugeln zusammen als einheitliches Fadenpendel schwingen, benennen wir das Schwingungsverhalten mit Phase 3.

Bei der Auswertung der Daten konzentrierten wir uns auf die Phase 1. Denn nur in diesem Zeitraum ergibt sich die für ein Newton's Cradle typische vertikale Auslenkung der ersten und der fünften Kugel. Die zweite Phase, die Übergangsphase, folgt nach unseren Aufzeichnungen keinem erkennbaren Muster, und die dritte Phase kann wie ein Fadenpendel mit einer einzigen Kugel betrachtet werden. Somit ist die erste Phase der interessanteste Abschnitt.

Bei der Versuchsdurchführung mit fünf Kugeln könnte man intuitiv denken, dass man das Schwingungsverhalten der ersten Kugel in Phase 1 auch mit einer Exponentialfunktion beschreiben kann. Genau zum Zeitpunkt des Stoßes geht Energie verloren, in der Zeit zwischen den Stößen nur vernachlässigbar wenig. Wir selbst erwarteten als Ergebnis eine Exponentialfunktion, da wir die Annahme hatten, dass bei jedem Stoß prozentual gleich viel Energie verloren geht. Somit würde also gelten:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_0 \cdot \alpha \\ E_2 &= E_1 \cdot \alpha = E_0 \cdot \alpha^2 \\ E_3 &= E_2 \cdot \alpha = E_0 \cdot \alpha^3 \end{aligned}$$

somit gilt:

$$E_n = E_0 \cdot \alpha^n$$

Als zweite Bedingung nahmen wir an, dass die Zeit zwischen zwei Stößen (T) immer gleich bleibt. Somit gilt:

$$\begin{aligned} n \cdot T &= t \\ n &= \frac{t}{T} \end{aligned}$$

$$E_{(t)} = E_0 \cdot \alpha^{\frac{t}{T}} = E_0 \cdot e^{\ln\left(\alpha^{\frac{t}{T}}\right)} = E_0 \cdot e^{\frac{t}{T} \cdot \ln(\alpha)} = E_0 \cdot e^{\frac{1}{T} \cdot \ln(\alpha) \cdot t} = E_0 \cdot e^{-\beta \cdot t}$$

Mit der Dämpfungskonstante $\beta = -\frac{1}{T} \cdot \ln(\alpha)$

Mit diesen Grundannahmen müsste sich der Graph der Hüllkurve in der ersten Phase also wie eine Exponentialfunktion verhalten, bei dem die Dämpfungskonstante jeweils gleich bleibt.

Überraschenderweise ist dies aber nicht der Fall. Denn ein Zusammenspiel verschiedener Faktoren ist hier die Ursache für das Abnehmen der Schwingungshöhe der ersten Kugel.

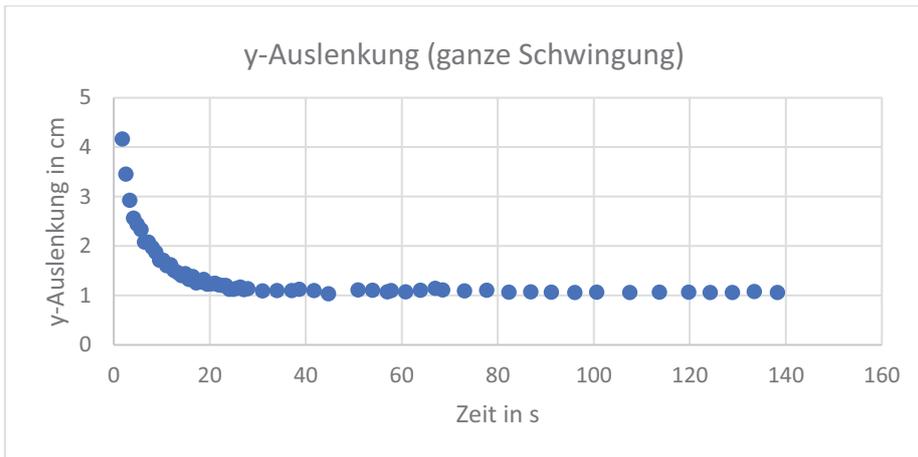


Abb. 16: y-Auslenkung der ersten Kugel einer normalen Newton Schaukel mit fünf Metallkugeln.

Aus der Abb. 16 separierten wir die Daten der Phase 1 der Newton Schaukel.

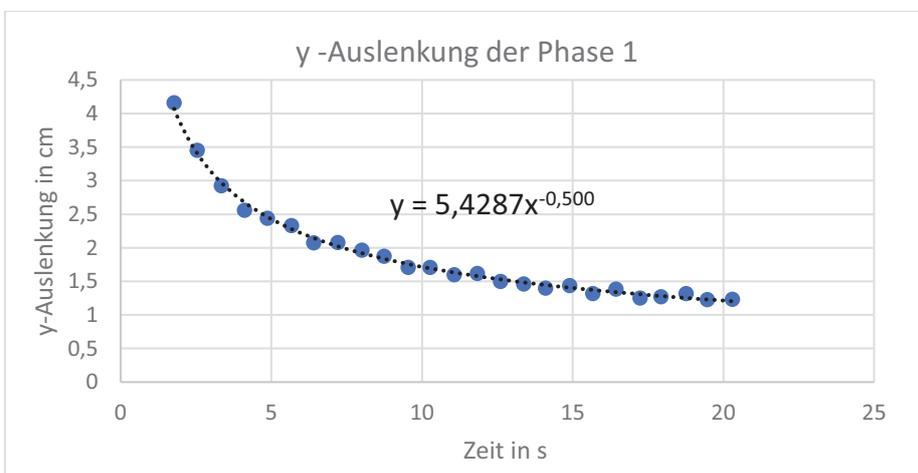


Abb. 17: Phase 1 der y-Auslenkung bei einem typischen Newton`s Cradle mit fünf Metallkugeln.

Die x-Achse zeigt die Zeit in Sekunden, die y-Achse die Auslenkung der ersten Kugel in Zentimeter. Die Phase 1 dauerte bei diesem Versuch 25 Sekunden. Während man intuitiv annehmen könnte, dass sich in der Phase 1 die erste Kugel mit einer Exponentialfunktion beschreiben lässt, ist dies jedoch nicht der Fall. In diesem Zeitraum folgen die Daten überraschenderweise dem Graphen einer Potenzfunktion. Diese lautet $y = 5,4287x^{-0,500}$.

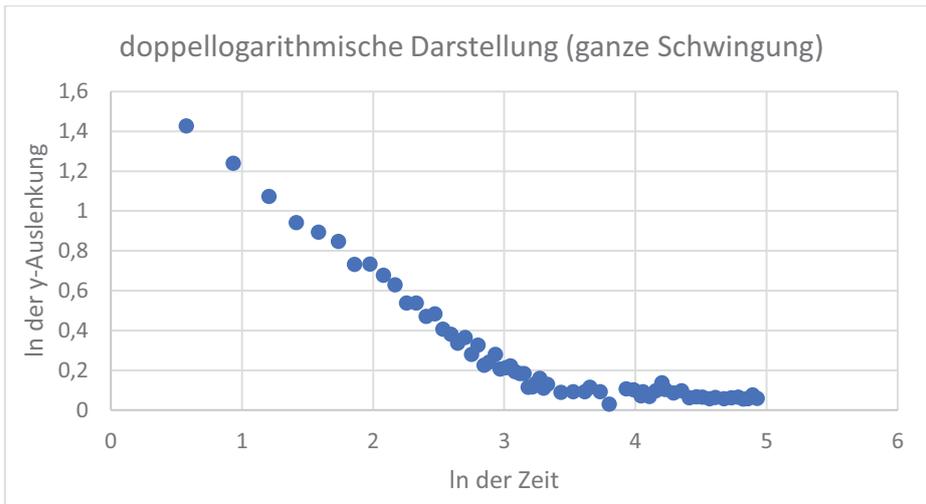


Abb. 18: Doppellogarithmische Darstellung der gesamten Schwingung eines typischen Newton's Cradles mit fünf Metallkugeln.

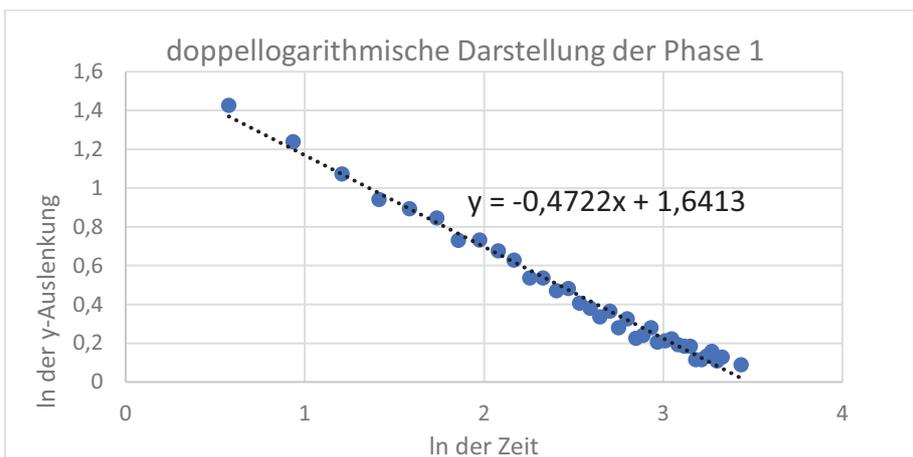


Abb. 19: Doppellogarithmische Darstellung der Phase 1 eines typischen Newton's Cradles mit fünf Metallkugeln.

Wenn man, wie in Abb. 18 und Abb. 19 dargestellt, die doppellogarithmische Darstellung der Zeit und der y-Auslenkung betrachtet, kann man gut erkennen, dass innerhalb der ersten 25 s diese Kurve nahezu linear verläuft. Somit kann innerhalb der ersten 25 s die y-Auslenkung der ersten Kugel mit einer Potenzfunktion beschrieben werden. Schon allein dieses Ergebnis ist äußerst interessant und wirft viele Fragen auf.

Wenn man sich daraufhin die y-Auslenkung der ersten Kugel bei dem zweiten Versuchsaufbau mit den Plastikugeln ansieht, ist das äußerst Erstaunliche, dass auch hier in der Phase 1 der Verlauf durch eine Potenzfunktion beschrieben werden kann.

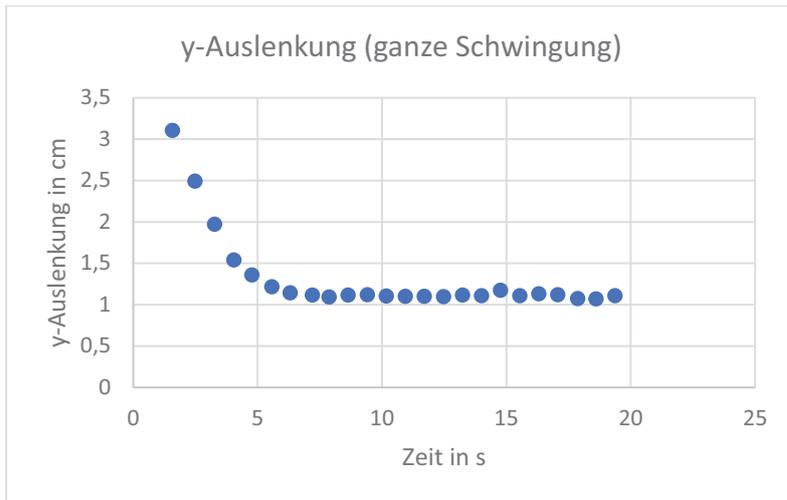


Abb. 20: y-Auslenkung der ersten Kugel einer normalen Newton Schaukel mit fünf Plastikkugeln.

Aus der Abb. 20 separierten wir wieder die Daten der Phase 1 der Newton Schaukel.

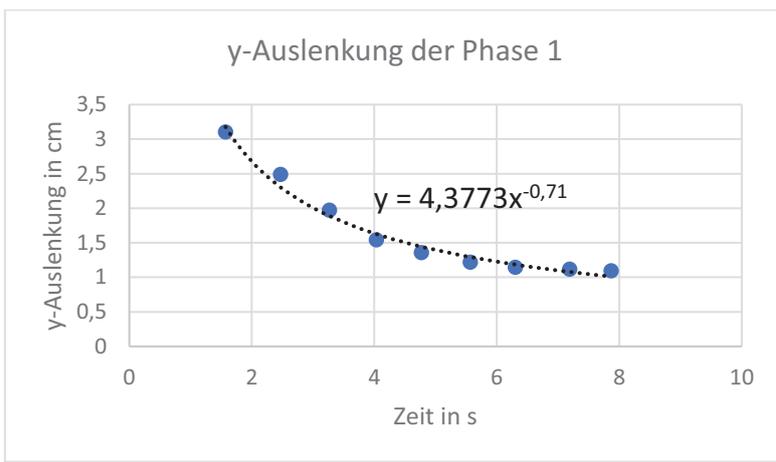


Abb. 21: Phase 1 der y-Auslenkung bei einem typischen Newton`s Cradle mit fünf Plastikkugeln.

Bei diesem Versuch ist die Phase 1 jedoch nur 7,2 s lang. Dies liegt am Material. Metallkugeln sind zum Beispiel härter, weswegen die Gesamtschwingungsdauer länger andauert.

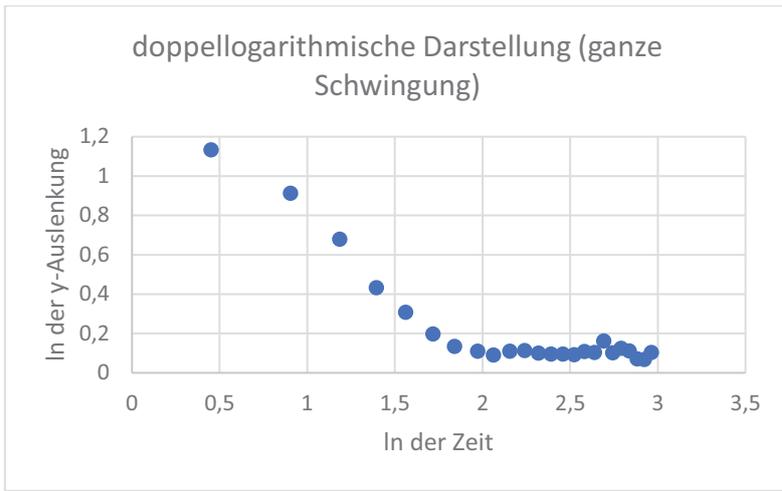


Abb. 22: Doppellogarithmische Darstellung der gesamten Schwingung eines typischen Newton's Cradles mit fünf Plastikugeln.

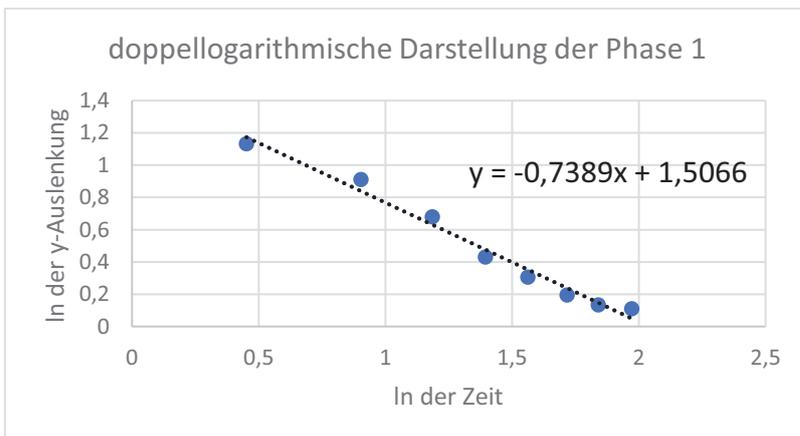


Abb. 23: Doppellogarithmische Darstellung der Phase 1 eines typischen Newton's Cradles mit fünf Plastikugeln.

Beim Betrachten der Abb. 22 und 23 lässt sich wieder erkennen, dass die doppellogarithmische Darstellung der Zeit und der y-Auslenkung innerhalb der ersten 7,2 s nahezu linear verläuft.

Somit kann auch in diesem Zeitraum die y-Auslenkung mit einer Potenzfunktion beschrieben werden. Diese lautet $y = 4,3774x^{-0,71}$. Folglich lässt sich also die sehr überraschende Aussage formulieren, dass bei einer typischen Newton Schaukel die y-Auslenkung der ersten Kugel unabhängig vom Material in der Phase 1 mit einer Potenzfunktion beschrieben werden kann.

Um die qualitative Aussagekraft unserer Ergebnisse zu bestätigen, wiederholten wir die Durchführung der jeweiligen Versuchsaufbauten. Wir ließen zunächst ein weiteres Mal ein typisches Newton's Cradle, bestehend aus fünf Metallkugeln,

ausschwingen. Wie in Abb. 24 gezeigt, folgt der Verlauf der ersten Kugel innerhalb der Phase 1 wieder einer Potenzfunktion.

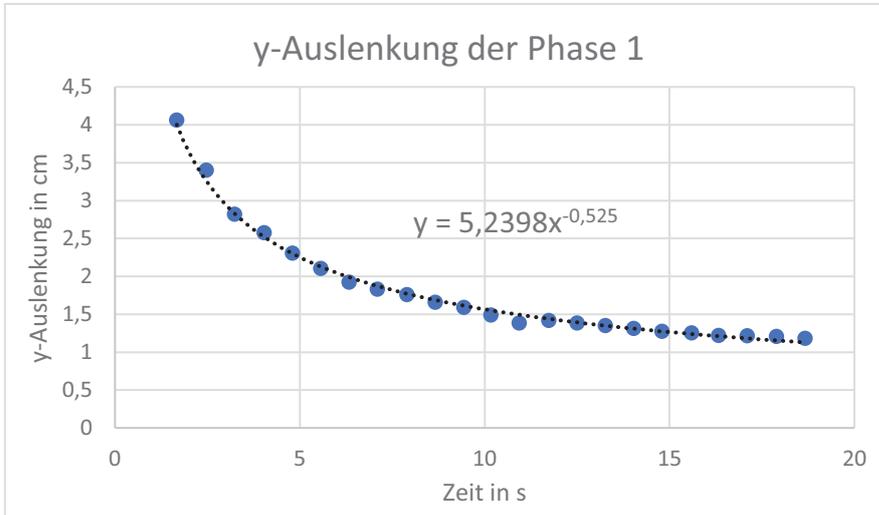


Abb. 24: Phase 1 der y-Auslenkung bei einem typischen Newton`s Cradle mit fünf Metallkugeln, zweite Versuchsdurchführung.

Diese Potenzfunktion lautet $y = 5,2398x^{-0,525}$. Verglichen mit der Funktion $y = 5,4287x^{-0,500}$, welche die Phase 1 des vorherigen Versuchs mit fünf Metallkugeln beschreibt, sieht man die große Ähnlichkeit der beiden Potenzfunktionen. Auch bei einem Vergleich der beiden Versuchsdurchführungen mit fünf Plastikku- geln sieht man deutlich die große Ähnlichkeit der beiden Funktionen.

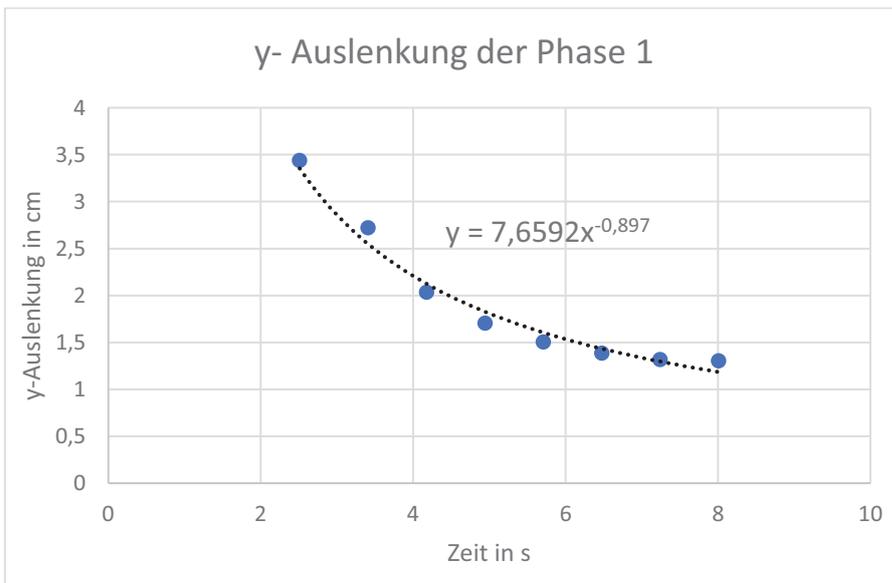


Abb. 25: Doppellogarithmische Darstellung der Phase 1 eines typischen Newton`s Cradles mit fünf Plastikku- geln, zweite Versuchsdurchführung.

Wie in Abb. 25 gezeigt, lautet die Potenzfunktion, welche die Phase 1 beschreibt, $y = 7,6592x^{-0,897}$. Zum Vergleich hier noch einmal die Funktion aus dem ersten Versuch: $y = 4,3773x^{-0,71}$. Offensichtlich ergeben sich hier größere Schwankungen bei den Ergebnissen als beim Vergleich der Funktionen der beiden Versuchsdurchführungen mit den Metallkugeln. Dafür gibt es aber eine plausible Erklärung, denn unsere Startwerte liegen an einem anderen Zeitpunkt. Normiert man also die Werte der beiden Diagramme auf die selbe Startzeit, ergibt sich folgende Funktion für den ersten Versuchsdurchlauf mit fünf Plastikugeln: $y = 3,2864x^{-0,582}$. Die Potenzfunktion beim zweiten Versuch lautet: $y = 3,5607x^{-0,567}$. Somit sind die Funktionen auch in diesem Versuchsaufbau sehr ähnlich.

Als Schlussfolgerung lässt sich somit noch einmal zusammenfassen, dass unabhängig vom Material der Kugeln die Phase 1 eines typischen Newton's Cradle mit einer Potenzfunktion der Form $y = a \cdot x^b$ mit b zwischen -0,5 und -0,6 beschrieben werden kann.

Dies wirft viele Fragen auf. Warum kann in der ersten Phase die Hüllkurve der ersten Kugel mit einer Potenzfunktion beschrieben werden, also warum ist das Ergebnis anders als unsere theoretischen Überlegungen erwarten lassen? Welche Faktoren sind entscheidend dafür, dass zu Beginn eine Potenzfunktion die Abnahme der vertikalen Auslenkung der ersten Kugel am besten beschreibt?

Antworten auf diese und noch weitere Fragen zu finden, stellte für uns eine große Herausforderung dar.

Auf der DPG-Frühjahrstagung hatten wir die Möglichkeit, diese Fragen an die beiden renommierten Physiker Prof. Dr. Ingo Rehberg (Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Preisträger, Universität Bayreuth), und Dr. Matthias Schröter (Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen) zu stellen. Auch wenn weder Prof. Dr. Ingo Rehberg noch Dr. Matthias Schröter ad hoc die Frage beantworten konnten, warum eine Potenzfunktion die Hüllkurve der Phase 1 am besten beschreibt, gaben uns die beiden Wissenschaftler gute Impulse, wie wir unsere Forschungen weiterführen könnten.

5.5.3 Diskussion und Erklärungsansatz zum Potenzgesetz $y = a \cdot x^b$

Wenn man sich mit Potenzgesetzen auseinandersetzt, fällt einem auf, dass komplexe Systeme oft mit Potenzgesetzen beschrieben werden können.¹⁵ Dies brachte uns auf die Idee, auch das Newton`s Cradle als ein komplexes System zu beschreiben. Denn es werden fünf Einzelpendel zu einem einzigen physikalischen System zusammengeführt. Daraus ergeben sich ganz neue Eigenschaften, die das Newton`s Cradle charakterisieren. Betrachtet man das Newton`s Cradle als ein komplexes System, kann man die Aussage formulieren, dass das erstaunliche Ergebnis unseres Versuchs mit den Eigenschaften eines komplexen Systems in Verbindung gebracht werden kann.

5.6 Versuchsdurchführung im Vakuum

Um herauszufinden, wie groß der Einfluss der Luftreibung auf das Schwingungsverhalten eines Newton`s Cradle ist, ließen wir eine typische Newton Schaukel im Vakuum schwingen. Die Schwingungsdauer bis zum Stillstand aller Kugeln verglichen wir mit der einer Newton Schaukel, die unter normalen Luftverhältnissen schwingt.

Unsere Versuche mit der Newton Schaukel in der Vakuum-Kammer unserer Schule zeigen, dass der Einfluss der Luftreibung geringer ist, als intuitiv erwartet wird. In dem Versuchsaufbau in einer Vakuum Kammer schwingt das Pendel 2:10 min. Der Unterschied der Schwingungsdauer beträgt nur drei Sekunden, da unser Pendel unter natürlichen Bedingungen 2:13 min schwingt.

6 Tracking-Programm

Das wissenschaftliche Tracking-Programm „Tracker Video Analysis und Modeling Tool“ von Douglas Brown in der Version 5.0.6 vom August 2018 kann sehr gut zur

¹⁵ Lopes 2018

Analyse eines Kugelstoßpendels verwendet werden. Allerdings wird die Software ab einer frame Anzahl von 3000 frames sehr langsam. Bei fünf seriellen Kugeln im Gestell dauert dann eine Analyse pro Kugel 10 Stunden und mehr. Eine präzise Analyse erfordert also sehr viel Zeit. Die Aussagekraft der Analyseergebnisse durch Tracker ist auf graphischer Ebene eindrucksvoll, die Daten sind genau und gut für weitere Überlegungen zu verwenden.

Die ausgedruckten Graphiken erlauben die „per Hand“ (Bleistift und Lineal) Bestimmung der einschlägigen Parameter. Die handbestimmten Parameter stimmen mit der Analyse-Software von Tracker (fast Fourier transform) überein: Sowohl die Frequenz nach der Software Tracker als auch die „per Hand“ berechnete Frequenz liegt bei 1,29 Hz. Die Qualität der Ergebnisse ist also sehr hoch.

7 Eine Newton Schaukel mit Quanten

Tang, Kao u.a. bauten eine Newton Schaukel mit Quanten.¹⁶ Dazu arbeiteten sie bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt (0 Kelvin = -273,15 Grad Celsius) (Bose-Einstein-Kondensat), (Abb. 26 und Abb. 27). Man vergleiche unten angeführte Graphiken aus Tang, Kao u.a. mit unserer Abb. 11. Es zeigt sich bezüglich der Experimente mit zwei oder mehr Kugeln eine deutliche Strukturanalogie. Tang, Kao u.a. teilen ihr Ergebnis in zwei Teile; zu Beginn ist die Abnahme sehr groß, im zweiten Teil dann im Vergleich gering. Dies kann man auch bei unseren Kurven erkennen, wir haben jedoch noch eine kurze, dritte Übergangsphase zwischen dem ersten und zweiten Abschnitt eingeführt. Diese ist auch in den Abbildungen von Tang, Kao u.a. beim Zeitpunkt $t = 0,2$ s bzw. $\hbar/t = 3$ zu erkennen. Eine weiterführende vergleichende Analyse der Graphiken von Tang, Kao u. a. mit unseren Kurven führt aber über den gegebenen Rahmen hinaus.

¹⁶ Tang, a. a. O.

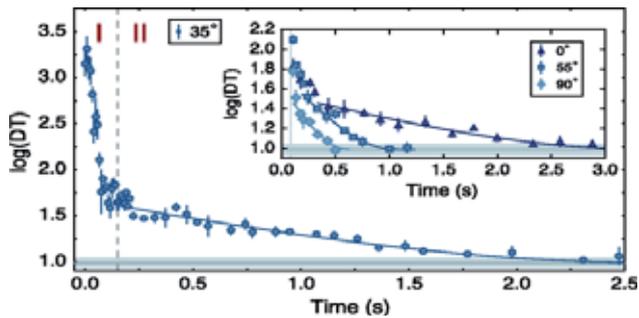


Abb. 26: Quanten Schaukel von Tang, Kao u.a., Figure 3

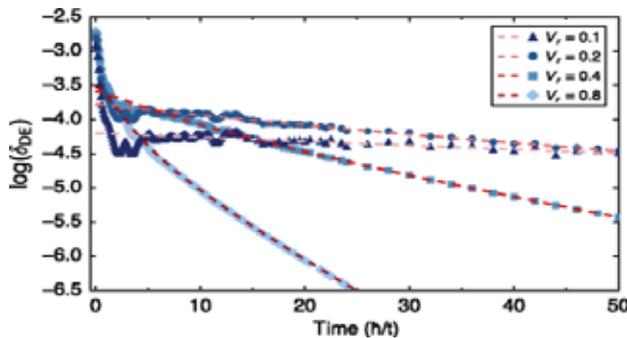


Abb. 27: Quanten Schaukel von Tang, Kao u. a., Figure 6

8 Abschließende Diskussion und Ausblick in die Zukunft

Die Newton Schaukel besteht aus einem Zusammenschluss von fünf physikalisch vollständig erklärbaren Einzelpendeln. Somit könnte man annehmen, dass man auch das Newton's Cradle mit den einfachen Gesetzmäßigkeiten eines Einzelpendels erklären kann. Tatsächlich stellte uns die Newton Schaukel vor viele Herausforderungen, denn die Newton Schaukel ist ein viel komplexeres System, als man zunächst erwarten könnte. Aber gerade deshalb fanden wir die Newton Schaukel so faszinierend und beschäftigten uns immer wieder aufs Neue mit ihr.

Auch wenn wir über ein Jahr lang mit der Newton Schaukel gearbeitet haben, wurden noch lange nicht alle Aspekte an der Newton Schaukel untersucht. Man kann unsere Versuche noch gut weiterführen und andere interessante Fragestellungen der Newton Schaukel in den Mittelpunkt der Experimente rücken. Um den Vorschlag von Herrn Dr. Matthias Schröter zu erwähnen: man könnte zum Beispiel mit einer Hochgeschwindigkeitskamera die Schwingungen der Newton Schaukel aufzeichnen, um die einzelnen Stöße zu analysieren. Das könnte zu sehr interessanten

Ergebnissen führen, denn wie wir schon herausgefunden haben, schwingen nicht nur die erste und die fünfte Kugel abwechselnd, sondern alle fünf Kugeln - wenn auch zu Beginn nur minimal - nach dem ersten Aufstoßen der fallengelassenen ersten Kugel. Es wäre also ein sehr interessanter Punkt, die Interaktion der Kugeln weiter zu untersuchen.

9 Zusammenfassung

Das Material der Aufhängung und Fixierung hat einen relevanten Einfluss auf das Schwingungsverhalten einer Newton Schaukel. Eine Plastikaufhängung, fixiert mit Heißkleber, ist zum Beispiel zu elastisch, weswegen sich das Schwingungsverhalten der Newton Schaukel verändert.

Je mehr Kugeln bei dem Newton`s Cradle schwingen, desto größer ist die Abnahme der Auslenkung der äußeren Kugel.

Je mehr Kugeln in die Kugelstoßkette integriert sind, desto kürzer schwingt das Pendel und desto früher tritt der Stillstand des Pendels ein.

Die Luftreibung hat keinen relevanten Einfluss auf das Schwingungsverhalten einer Newton Schaukel.

Impuls- und Energieerhaltung reichen nicht aus, um das Phänomen der Newton Schaukel ausreichend zu erklären. Dies lässt sich an den Versuchsergebnissen eines Versuchsaufbaus, bei dem die ersten zwei Kugeln durch eine Kugel doppelter Masse ersetzt werden, zeigen.

Für das Verstehen der Newton Schaukel ist die Anwendung der Symmetriebetrachtungen von Emmy Noether sinnvoll. Bei der Verwendung von Kugeln ungleicher Größe ist die Ortssymmetrie verletzt.

Unabhängig vom Material der Kugeln kann das Schwingungsverhalten der ersten Kugel bei einer typischen Newton Schaukel in der Phase 1 der Schwingung mit einer Potenzfunktion der Form $y = a \cdot x^b$ ($-0,6 < b \leq -0,5$) beschrieben werden. Dies zeigt sich in zwei verschiedenen Versuchsaufbauten. In dem einen wird ein

typisches Newton`s Cradle mit fünf Metallkugeln untersucht, im anderen Versuchsaufbau werden die Metallkugeln durch fünf Plastikkugeln gleichen Durchmessers ersetzt.

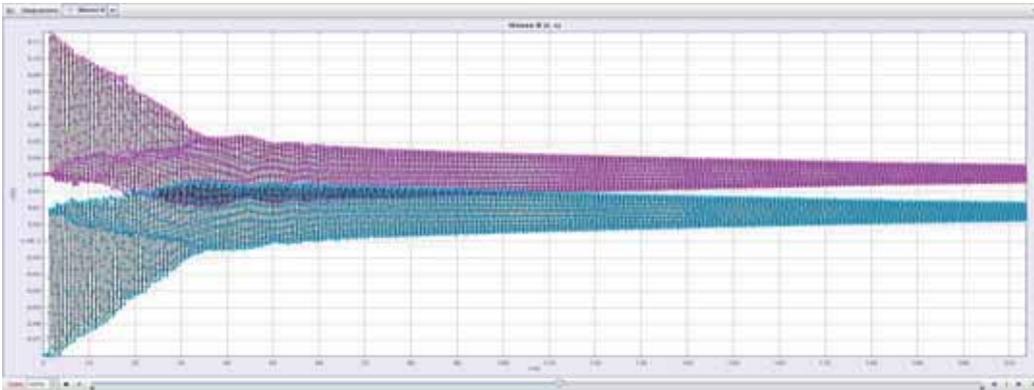
Tang, Kao u.a. bauten eine Newton Schaukel aus Quanten.¹⁷ Deren Graphiken haben große Ähnlichkeiten mit unseren Ergebnissen.

Tracker ist ein sehr gutes Programm, um die Newton Schaukel zu untersuchen. Allerdings ist es sehr zeitaufwändig, sofern man ein Video bis zum Stillstand der Kugeln untersuchen möchte. Plant man genügend Zeit ein, erhält man mit der Software Tracker exzellent objektive, reliable und valide Datensätze.

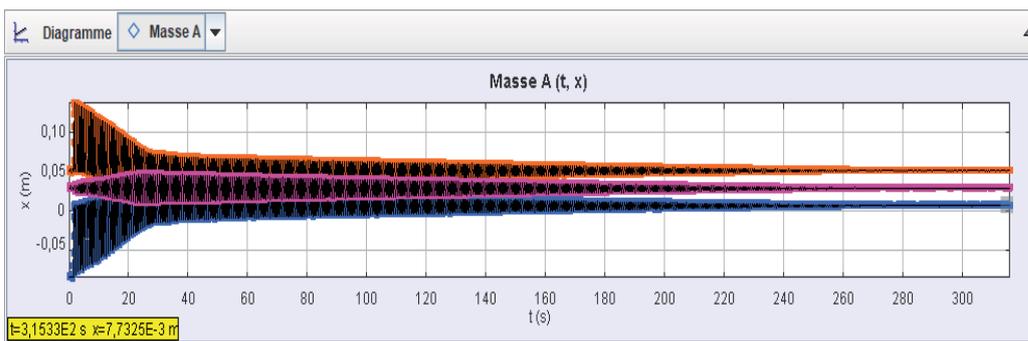
¹⁷ Tang, a. a. O.

10 Anhang

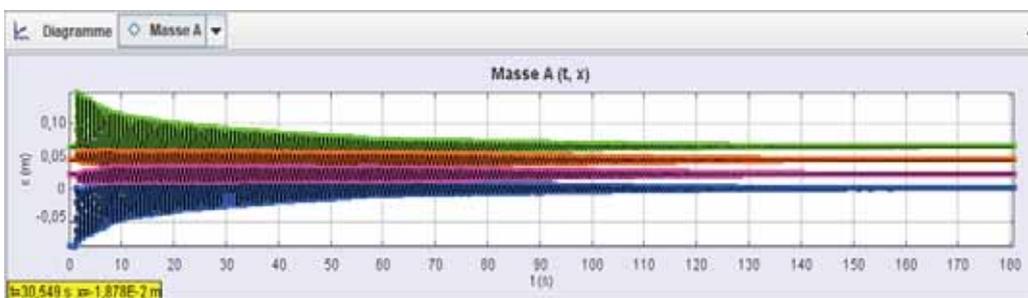
Hier die Diagramme der Versuche mit zwei, drei und vier Kugeln:



Versuch mit zwei integrierten Kugeln



Versuch mit drei integrierten Kugeln



Versuch mit vier integrierten Kugeln

11 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: eine typische Newton Schaukel.	4
Abb. 2: Grundstruktur.	4
Abb. 3: Startvorrichtung.	5
Abb. 4: Metallkugeln ohne Aufhängung.....	8
Abb. 5: Aufgehängte Metallkugeln.....	8
Abb. 6: Metallkugeln mit Aufhängung.	8
Abb. 7: Tracker-Diagramm für eine Kugel, somit ein einfaches Fadenpendel.....	10
Abb. 8: Tracker-Diagramm für fünf Kugeln, also eine typische Newton Schaukel.	10
Abb. 9: Abnahme der Auslenkung der ersten Kugel bei einem bifilaren Fadenpendel. Die y-Achse zeigt die y-Auslenkung in cm, die x-Achse die Zeit in s.	11
Abb. 10: Abnahme der Auslenkung der ersten Kugel bei einem typischen Newton's Cradle mit fünf Kugeln. Die y-Achse zeigt die y-Auslenkung in cm, die x- Achse die Zeit in s.	11
Abb. 11: Hüllkurven der y-Auslenkung der ersten Kugel bei variabler Gesamtkugelanzahl: violett der Versuch mit einer Kugel, grün mit zwei, blau mit drei, orange mit vier und gelb mit fünf Kugeln.	12
Abb. 12: Tracker-Diagramm der x-Achse einer Newton Schaukel, bei der die beiden ersten Kugeln gemeinsam starten. Die mittlere Kugel ist nicht eingezeichnet. Startkugeln sind die erste Kugel (blau) und die zweite Kugel (gelb).	15
Abb. 13: Newton Schaukel mit einer Kugel doppelter Masse als Startkugel (blau), die mittlere Kugel ist nicht dargestellt. Die ungleiche Auslenkung der zwei letzten Kugeln zu Beginn (grün und rot) ist gut zu sehen.	15
Abb. 14: Translations-Symmetrie im Sinne von Emmy Noether und Brechung dieser bei einer Kugel mit doppelter Masse (grün). Der rote Vektor quantifiziert die Brechung der Translations-Symmetrie. Die Translations-Symmetrie steht im Zusammenhang mit der Impulserhaltung und ist nicht gegeben, sofern man die	

beiden rechten Kugeln als systemäquivalent zur großen grünen Kugel betrachtet.	16
Abb. 15: Newton´s Cradle mit Plastikkugeln.	17
Abb. 16: y -Auslenkung der ersten Kugel einer normalen Newton Schaukel mit fünf Metallkugeln.	20
Abb. 17: Phase 1 der y -Auslenkung bei einem typischen Newton`s Cradle mit fünf Metallkugeln.	20
Abb. 18: Doppellogarithmische Darstellung der gesamten Schwingung eines typischen Newton`s Cradles mit fünf Metallkugeln.	21
Abb. 19: Doppellogarithmische Darstellung der Phase 1 eines typischen Newton`s Cradles mit fünf Metallkugeln.	21
Abb. 20: y -Auslenkung der ersten Kugel einer normalen Newton Schaukel mit fünf Plastikkugeln.	22
Abb. 21: Phase 1 der y -Auslenkung bei einem typischen Newton`s Cradle mit fünf Plastikkugeln.	22
Abb. 22: Doppellogarithmische Darstellung der gesamten Schwingung eines typischen Newton`s Cradles mit fünf Plastikkugeln.	23
Abb. 23: Doppellogarithmische Darstellung der Phase 1 eines typischen Newton`s Cradles mit fünf Plastikkugeln.	23
Abb. 24: Phase 1 der y -Auslenkung bei einem typischen Newton`s Cradle mit fünf Metallkugeln, zweite Versuchsdurchführung.	24
Abb. 25: Doppellogarithmische Darstellung der Phase 1 eines typischen Newton`s Cradles mit fünf Plastikkugeln, zweite Versuchsdurchführung.	24
Abb. 26: Quanten Schaukel von Tang, Kao u.a., Figure 3.....	28
Abb. 27: Quanten Schaukel von Tang, Kao u. a., Figure 6.....	28

12 Literaturverzeichnis

Herrmann, F./Schmälzle, P.: Simple explanation of a well-known collision experiment. In: American Journal of Physics 49, 761, 1980

Herrmann, F./Seitz, M.: How does the ball-chain work? In: American Journal of Physics 50, 977, 1982

Huppertz, Simon/Heck, Kristof: Untersuchungen zur Kugelstoß-Pendelkette und zur Hertzschen Kontakt-Theorie. Jugend forscht, 2014

Hutzler, Stefan/Delaney, Garry u. a.: Rocking Newton`s Cradle. In: American Journal of Physics 72, 1508, 2004

Lincoln, Don: The most significant genius: Emmy Noether. Unter: <https://www.youtube.com/watch?v=Rqfj7n5aSwY> (Stand: 29.10.2019)

Lopes, António/Tenreiro Machado, José: Power Law Behaviour in Complex Systems. In: Entropy 20, 671, 2018

Maurer, Werner: Kugelstosspendel - Newton's Cradle. Unter: <https://www.youtube.com/watch?v=uXI09nkg7mA> (Stand: 29.10.2019)

Meschede, Dieter (Hrsg.): Gerthsen Physik. Springer- Verlag, Berlin Heidelberg, 2015²⁵

Noether, Emmy: Invariante Variationsprobleme. Nachr. d. König. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen, Math-phys. Klasse 18, 235-237, 1918

Olver Peter/ Gregory Ruth: Convergence Public Lecture: Emmy Noether: Her Life, Work, and Influence. Unter: <https://www.youtube.com/watch?v=tNNyA-yMRsgE&feature=youtu.be> (Stand: 29.10. 2019)

Tang, Yijun/Kao, Will u. a.: Thermalization near Integrability in a Dipolar Quantum Newton`s Cradle. American Physical Society: Phys.Rev.X8 021030, 2018, S. 1f

Trautwein, Alfred/Kreibig, Uwe u. a.: Physik für Mediziner, Biologen und Pharmazeuten. Walter de Gruyter, Berlin, 1983³

13 Danksagungen, Unterstützer

Wir bedanken uns sehr herzlich bei Herrn StR Dr. Thomas Grillenbeck für die beständige Unterstützung und große Hilfe.

Wir bedanken uns bei Herrn Rektor OStD Dr. Dieter Friedel für die Schaffung der Rahmenbedingungen zur Teilnahme an Jugend forscht und des Wettbewerbs GYPT.

Wir bedanken uns bei Herrn StR Rainer Hofmann für die Hilfe beim Versuchsaufbau mit der Vakuumkammer.

Wir bedanken uns bei den Organisatoren von Jugend forscht und des Wettbewerbs GYPT für die Möglichkeit der Teilnahme.

Wir bedanken uns bei Herrn Prof. Dr. Ingo Rehberg und Herrn Dr. Matthias Schröter für die interessanten Gespräche.

Wir bedanken uns bei Herrn Rolf-Dieter Klein für das freundliche Bereitstellen seiner 3D-Drucker.

Wir bedanken uns bei Dr. Stefan Geier für die geduldigen Diskussionen und die Bereitstellung der Computer, die tagelang liefen, und bei Dr. Michèle Geier-Noehl für das geduldige Korrekturlesen.