

VERSUCHSBERICHT ZU

M2 - GEKOPPELTE PENDEL

Gruppe 6Mi

Alexander Neuwirth (E-Mail: a_neuw01@wwu.de)
Leonhard Segger (E-Mail: l_segg03@uni-muenster.de)

durchgeführt am 22.11.2017
betreut von
Martin Körsgen

28. November 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	3
2	Methoden	3
3	Ergebnisse und Diskussion	3
3.1	Pendel	3
3.2	Gekoppelte Pendel	4
3.2.1	Statische Bestimmung des Kopplungsgrades	4
3.2.2	Gleichschwingung	4
3.2.3	Gegenschwingung	5
3.2.4	Schwebungen des gekoppelten Systems	6
3.2.5	Vergleich der Schwingdauern	8
3.2.6	Dynamische Bestimmung des Kopplungsgrads	8
3.2.7	Relative Frequenzaufspaltung	9
3.2.8	Diskussion der Näherung	9
3.3	Doppelpendel	10
4	Schlussfolgerung	10

1 Kurzfassung

In diesem Versuch wurde das Verhalten von zwei Pendeln, die mittels einer Feder gekoppelt wurden, untersucht. Dazu sollte der Kopplungsgrad dynamisch sowie statisch bestimmt werden. Es wurde mit zwei verschiedenen starken Federn experimentiert. Zuletzt haben wir ein Doppelpendel beobachtet und dessen Bewegung mit der der gekoppelten Pendel verglichen.

2 Methoden

Der Versuch besteht aus zwei Pendeln die mittels verschieden starken Federn gekoppelt werden. Damit beide Pendeln mit der gleiche Eigenfrequenz schwingen, haben wir die Länge der Pendel so angepasst, dass sie auch nach ca. 20 Perioden ohne Kopplung synchron schwingen. Der Kopplungsgrad und die relative Frequenzaufspaltung wurde statisch sowie dynamisch bestimmt. Bei der statischen Messung wird ein Pendel ausgelenkt und die resultierende Auslenkung des anderen Pendels aufgenommen. Dynamisch ergibt sich der Kopplungsgrad aus den Schwingdauern der Grundschrwingungen einer gleichsinnigen und gegensinnigen Bewegung. Zum Bestimmen der Schwingdauern wurde ein Ultraschall-Entfernungssensor verwendet, jedoch traten beim Testen der Messapparatur bei Sensorfrequenzen über 50 Hz Softwareprobleme auf. Experimentiert wurde mit einer Feder aus Kupfer und einer vermutlich aus Edelstahl bestehenden Feder. Das Verhalten eines Doppelpendels wurde beobachtet mit verschiedenen initialen Auslenkungen und Geschwindigkeiten.

3 Ergebnisse und Diskussion

In allen folgenden Abbildungen sind in schwarz Entfernungsmessungspunkte des Ultraschallsensors mit 50 Hz, sowie ein nicht linearer Fit in rot aufgetragen. Die Fit-Kurven wurden gemäß dem „Scaled Levenberg-Marquardt algorithm“ erzeugt. Gemessen wurde immer über 60 Sekunden, lediglich zum Bestimmen der Schwebungsdauer wurde über 120 Sekunden gemessen.

3.1 Pendel

Die Schwingdauer eines einzelnen Pendels lässt sich am Parameter b ablesen. Somit ist $T_0 = 2,477$ s.

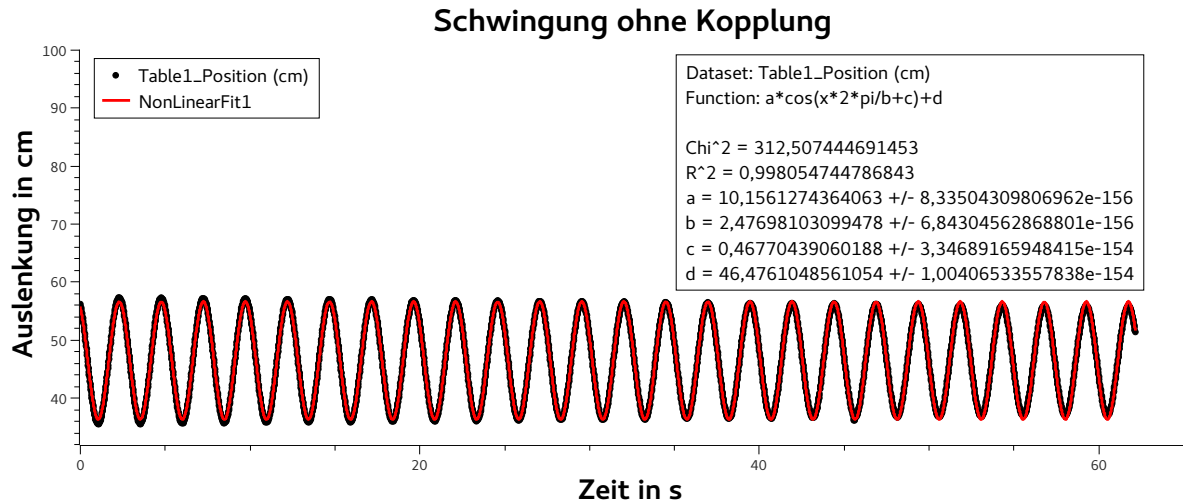


Abbildung 1: Schwingung eines Fadenpendels.

3.2 Gekoppelte Pendel

3.2.1 Statische Bestimmung des Kopplungsgrades

Die gegebene Formel für den Kopplungsgrad lautet:

$$k = \frac{x_2}{x_1}. \quad (1)$$

Die Auslenkung der Pendel konnte bis auf $\Delta x = \pm 0,1$ cm genau bestimmt werden. Für die Unsicherheit ergibt sich also $u(x) = \frac{0,2 \text{ cm}}{2\sqrt{3}} = 0,058$ cm.

$$u(k) = \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial x_1} u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial x_2} u(x_2)\right)^2} = k u(x) \sqrt{\left(\frac{1}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{x_2}\right)^2} \quad (2)$$

Tabelle 1: Messwerte beim Auslenken eines Pendels um x_1 und der resultierende Ausschlag des gekoppelten Pendels um x_2

	Kupfer	Edelstahl
x_1	$(9,800 \pm 0,058)$ cm	$(10,000 \pm 0,058)$ cm
x_2	$(1,900 \pm 0,058)$ cm	$(3,100 \pm 0,058)$ cm
k	$0,194 \pm 0,006$	$0,310 \pm 0,006$

3.2.2 Gleichschwingung

Kupfer

Aus Abb. 2 lässt sich $T_{\text{gl,Cu}}$ aus den Parametern des Fits ablesen. Der Parameter b ist die Schwingdauer und beträgt 2,4645 s.

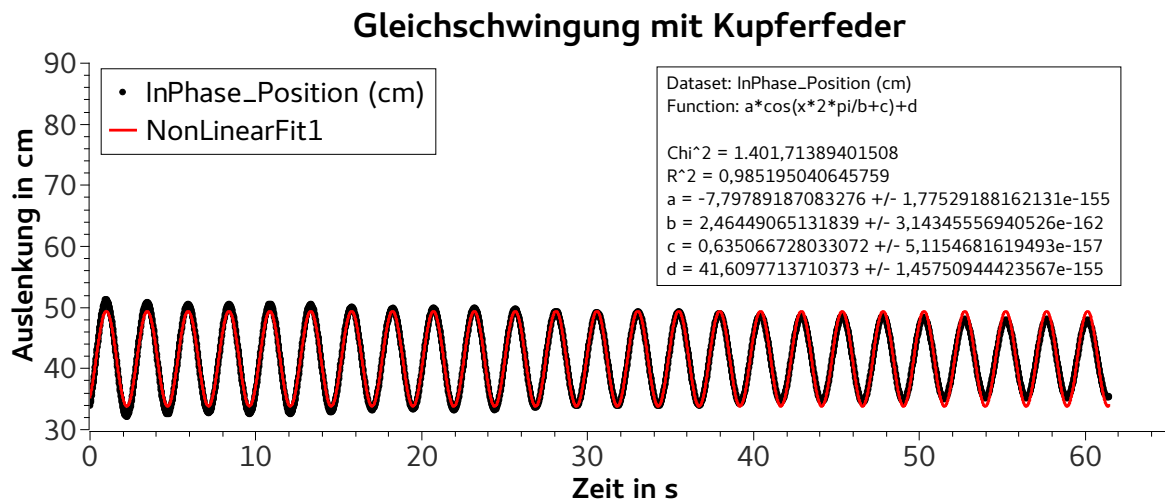


Abbildung 2: Gleichschwingung mit Kupferfeder.

Edelstahl

Aus Abb. 3 lässt sich $T_{gl,St}$ aus den Parametern des Fits ablesen. Der Parameter b ist die Schwingdauer und beträgt 2,4437 s.

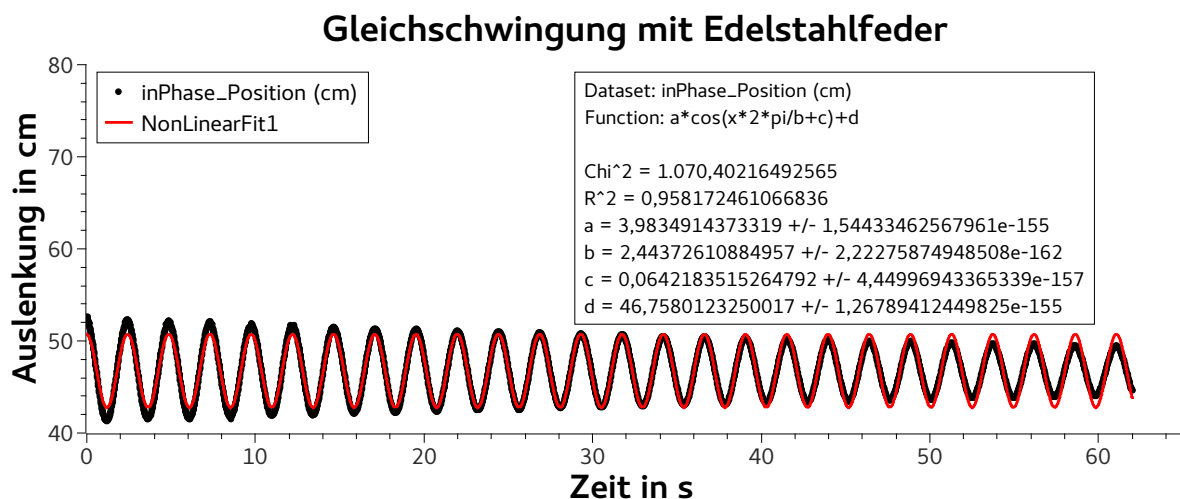


Abbildung 3: Gleichschwingung mit Edelstahlfeder.

3.2.3 Gegenschwingung

Kupfer

Aus Abb. 4 lässt sich $T_{geg,Cu}$ aus den Parametern des Fits ablesen. Der Parameter b ist die Schwingdauer und beträgt 2,0381 s.

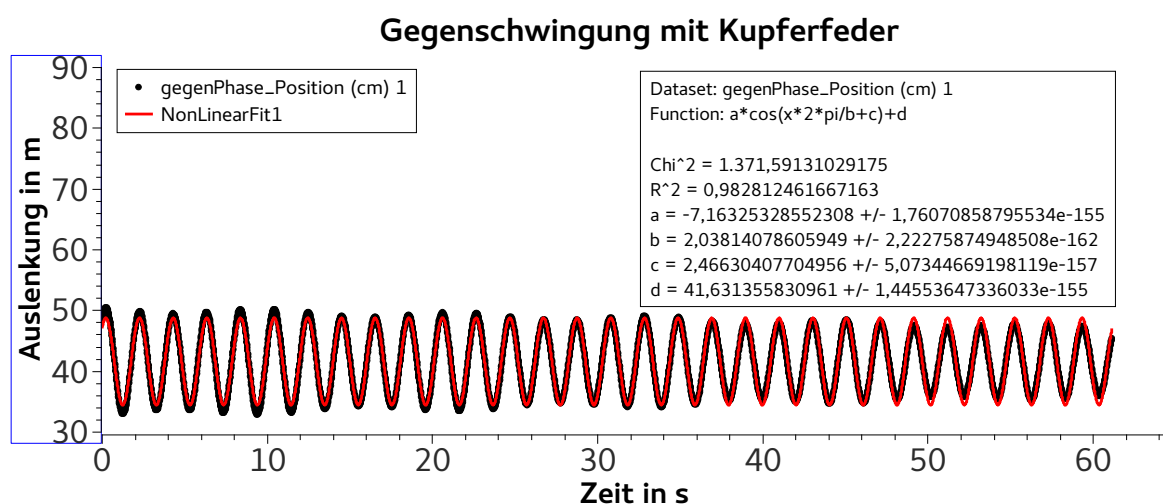


Abbildung 4: Gegenschwingung mit Kupferfeder.

Edelstahl

Aus Abb. 5 lässt sich $T_{\text{geg,St}}$ aus den Parametern des Fits ablesen. Der Parameter b ist die Schwingdauer und beträgt 1,7518 s.

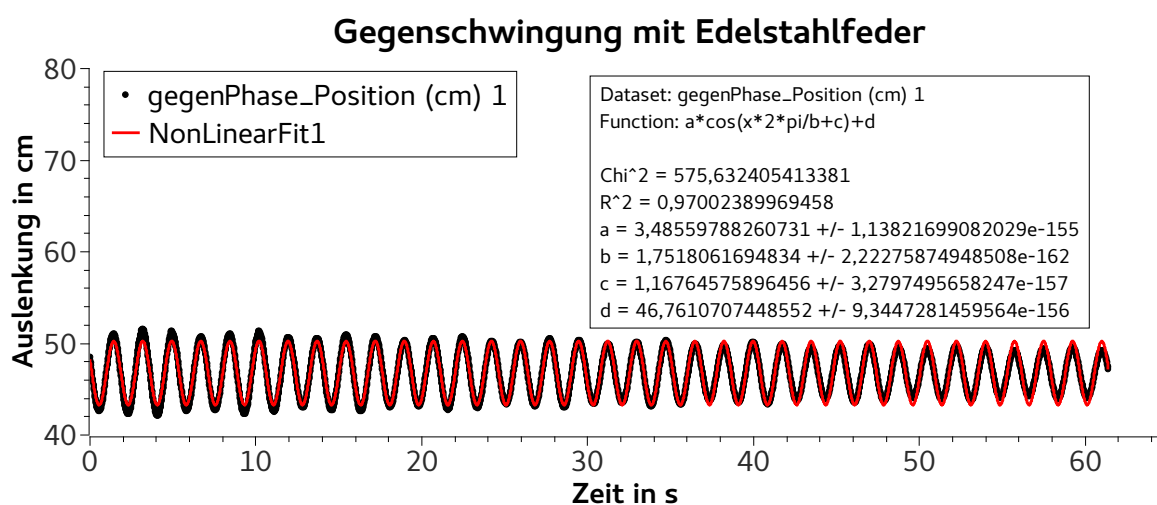


Abbildung 5: Gegenschwingung mit Edelstahlfeder.

3.2.4 Schwebungen des gekoppelten Systems

Kupfer

Aus Abb. 6 lässt sich $T_{S,Cu}$ aus den Parametern des Fits ablesen. Der Parameter c gibt die Winkelgeschwindigkeit der Schwebung an. Folglich ist die Schwebungsdauer $T_{S,Cu} = \frac{2\pi}{\omega} = 23,484 \text{ s}$.

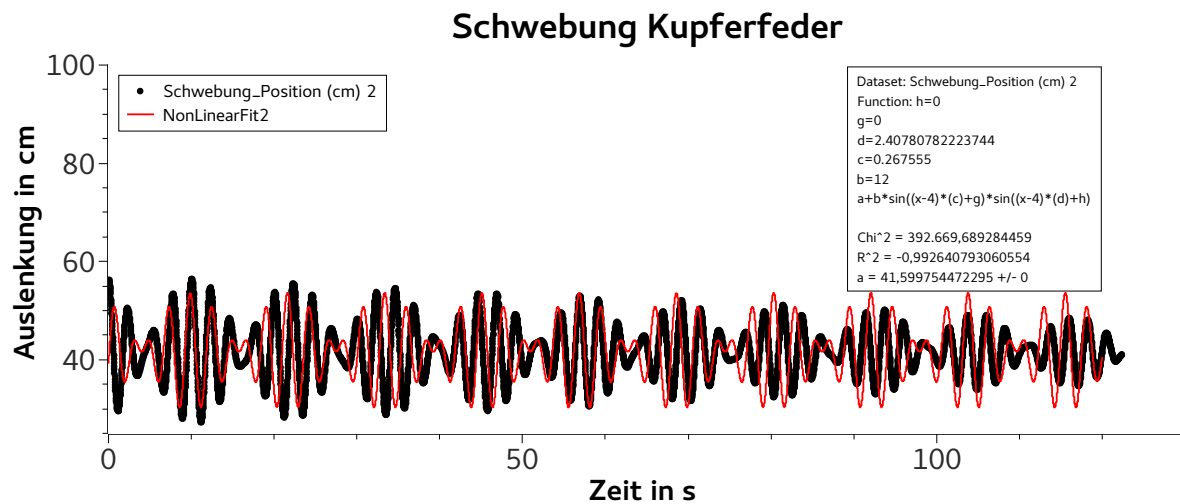


Abbildung 6: Schwebungen mit Kupferfeder.

Edelstahl

Aus Abb. 7 lässt sich $T_{S,St}$ aus den Parametern des Fits ablesen. Der Parameter c gibt die Winkelgeschwindigkeit der Schwebung an. Folglich ist die Schwebungsdauer $T_{S,St} = \frac{2\pi}{\omega} = 12,323 \text{ s}$.

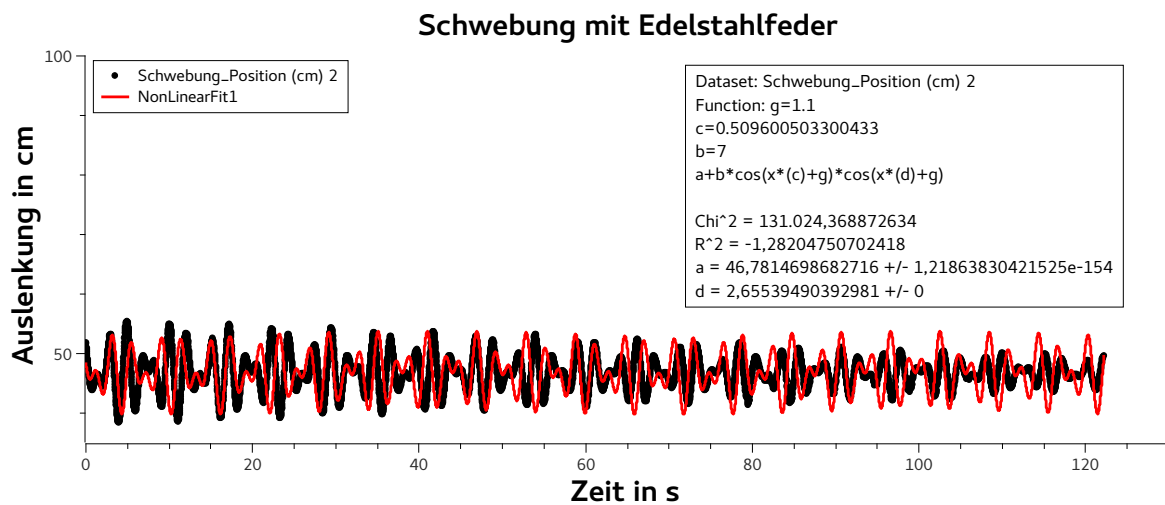


Abbildung 7: Schwebungen mit Edelstahlfeder.

3.2.5 Vergleich der Schwingdauern

Tabelle 2: Messwerte gekoppelter Pendel

	Kupfer	Edelstahl
T_{gl}	2,4645 s	2,4437 s
T_{geg}	2,0381 s	1,7518 s
T_S	23,484 s	12,323 s

Auffällig ist der Zusammenhang

$$T_0 > T_{gl,Cu} > T_{gl,St}. \quad (3)$$

Der Theorie nach sollte jedoch gelten

$$T_0 = T_{gl,Cu} = T_{gl,St}. \quad (4)$$

Es ist anzunehmen, dass die veränderte Schwingdauer durch das Einbinden der Feder in das System verursacht wurde. Im idealen Fall würde die Ruhelänge der Feder dem Abstand der Pendel, wenn sie nicht schwingen, entsprechen. Beim Koppeln der Pendel änderte sich die Ruhelage der Pendel. Dies hat zur Folge, dass der Abstand der Pendel nicht mehr für alle Zeiten gleich ist, wenn sie mit der selben Frequenz schwingen.

In der Anleitung war diese Formel für die Schwebungsdauer gegeben:

$$T_S = \frac{4\pi}{\omega_{geg} - \omega_{gl}} = \frac{2}{\frac{1}{T_{geg}} - \frac{1}{T_{gl}}} \quad (5)$$

Tabelle 3: Schwebungsdauern berechnet aus den Schwingdauern

	Kupfer	Edelstahl
T_S	23,560 s	12,374 s

3.2.6 Dynamische Bestimmung des Kopplungsgrads

Setzt man die ermittelten Schwingdauern in

$$k = \frac{T_{gl}^2 - T_{geg}^2}{T_{gl}^2 + T_{geg}^2} \quad (6)$$

ein, ergeben sich folgende Kopplungsgrade:

Tabelle 4: Kopplungsgrade aus den Schwingdauern

	Kupfer	Edelstahl
k	0,187	0,3211

3.2.7 Relative Frequenzaufspaltung

Die relative Frequenzaufspaltung lässt sich mittels der gegebenen Formeln bestimmen.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{geg} - \omega_{gl}}{\omega_{gl}} = 2 \frac{T_{gl}}{T_S} \quad (7)$$

Tabelle 5: relative Frequenzaufspaltungen

	Kupfer	Edelstahl
$\frac{\Delta\omega}{\omega_0}$	0,210	0,397

3.2.8 Diskussion der Näherung

Zum Berechnen der relative Frequenzspaltung ist außerdem die folgende Formel aufgeführt

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} - 1 \quad (8)$$

und deren Näherung

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = k + \frac{k^2}{2} + \frac{k^3}{2} + O(k^4) \quad (9)$$

Die Unsicherheit von unserem k beträgt 0,006. Für die Formel ergibt sich die Unsicherheit

$$u\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) = \left| \frac{\partial(\frac{\Delta\omega}{\omega_0})}{\partial k} u(k) \right| = \left| \frac{u(k)}{(k-1)^2 \sqrt{\frac{1+k}{1-k}}} \right| \quad (10)$$

und für die Näherung

$$u\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) = \left| \frac{\partial(\frac{\Delta\omega}{\omega_0})}{\partial k} u(k) \right| = \left| u(k) \left(1 + k + \frac{3}{2}k^2\right) \right| \quad (11)$$

Tabelle 6: relative Frequenzaufspaltungen

	Kupfer	Edelstahl
Aus den Schwingdauern	0,210	0,397
Aus der Kopplungsformel	$0,2171 \pm 0,0076$	$0,3779 \pm 0,0091$
Aus der Kopplungsnäherung	$0,2165 \pm 0,0075$	$0,3729 \pm 0,0087$

Die relative Abweichung des Wertes der Näherung zu dem der Formel beträgt für die Edelstahlfeder ca. 1 % und für die Kupferfeder ca. 0,2 %.

Unsicherheiten

Der Ultraschallsensor misst lediglich den Abstand in der Horizontalen, das Pendel dagegen rotiert in einer Ebene. Da bei diesem Versuch der Fokus auf den Schwingdauern lag, ist der Fehler der somit die Amplitude der Schwingung skaliert irrelevant. Des Weiteren muss man davon ausgehen, dass das Verarbeiten der Daten des Sensors Zeit beansprucht, da diese jedoch jeden Messpunkt gleichermaßen zeitlich verschiebt kann auch dieser Fehler für eine Betrachtung der Schwingdauern vernachlässigt werden.

Die Fehler der Fitalgorithmen wurden nicht weiter betrachtet, da sie in der Größenordnung kleiner 10^{-100} liegen.

3.3 Doppelpendel

Das Doppelpendel schwingt sehr chaotisch, d.h. es gibt auch bei nur sehr kleinen Änderungen in den Anfangsbedingungen andere Bahnen. Außerdem konnten wir zwei stabile Schwingungen beobachten, jedoch nur für ca. 5 Perioden. Danach ergaben sich minimal phasenverschobene Schwingungen. Bei einer der stabilen Schwingungen haben beide Pendel immer in die selbe Richtung gezeigt. Die andere zeichnet sich dadurch aus, dass die Pendel immer den entgegengesetzten Winkel zur Vertikalen haben.

4 Schlussfolgerung

Da wir die Feder nur ca. 10 cm über den Gewichten der Pendel befestigt hatten, ergaben sich für unsere Messungen ein hoher Kopplungsgrad. Entsprechend sind unsere relativen Frequenzaufspaltungen hoch und die Schwebungsdauern klein. Dies machte die Auswertung ungenauer. Des Weiteren hätte sich mit geringerem Kopplungsgrad auch die Frequenzen der Gleichschwingungen weniger von der Eigenfrequenz des einzelnen Pendels unterschieden. Die Taylorentwicklung 3. Ordnung erwies sich bei unseren Kopplungsgraden als eine gute Approximation der Formel für die relative Frequenzaufspaltung mit ca. 1 % Abweichung. Gleichmaßen wie bei den gekoppelten Fadenpendeln gab es auch beim Doppelpendel zwei stabile Schwingungen. Deutlich unterschieden sich die Pendel, wenn keiner der Spezialfälle vorlag. Die gekoppelten Pendel oszillierten noch erkennbar mit der Überlagerung von zwei Schwingungen. Das Doppelpendel dagegen schwang chaotisch und ein periodischer Zusammenhang war nicht ersichtlich.