

Praktikum für Naturwissenschaftler

---

# RESONANZ

---

Assistent: Lukas Wolz

21. FEBRUAR 2019

NINA KÖDER, LAURA KLINGER  
Gruppe 5, Medizintechnik

## Inhaltsverzeichnis

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 1. Zielführung                | -2-  |
| 2. Versuchsaufbau             | -2-  |
| 3. Versuchsdurchführung       | -2-  |
| 4. Auswertung                 | -3-  |
| Freie, ungedämpfte Schwingung | -3-  |
| Erzwungene Schwingung         | -7-  |
| 5. Anhang Messwerte           | -10- |

## 1. Zielführung

Das Ziel des Versuches „Resonanz“ besteht darin, das Prinzip verschiedener Schwingungen kennenzulernen und zu verstehen. Dazu wurden Messungen zu einer freien, ungedämpften Schwingung und zu einer erzwungenen Schwingung eines Federpendels mit geringer Reibung durchgeführt. Anhand dieser Versuche sollte ein Verständnis des Phänomens „Resonanz“ erlangt werden und die Auswertung verschiedener Schwingungskurven geübt werden.

## 2. Versuchsaufbau

In diesem Versuch wird ein Luftkissengleiter verwendet, welcher mit Gewichten (Messingstücken) oder Magneten, zur Erzeugung von geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung, bestückt werden kann. Dieser kann nun auf einer Luftkissenbahn mit geringer Reibung hin- und herschwingen.

Der Gleiter ist an seinen Enden an jeweils einer Schraubenfeder befestigt und somit auch an seine Ruhelage gebunden. An dem Ende der einen Feder befindet sich ein Motor, durch welchen der Gleiter zu einer erzwungenen Schwingung angeregt werden kann.

Des Weiteren enthält der Versuchsaufbau ein Lasermesssystem, wodurch die Position des Gleiters aufgezeichnet werden kann. Dadurch können mithilfe des Programmes „CassyLab 2“ Weg-Zeit-Diagramme aufgezeichnet, dargestellt und ausgewertet werden.

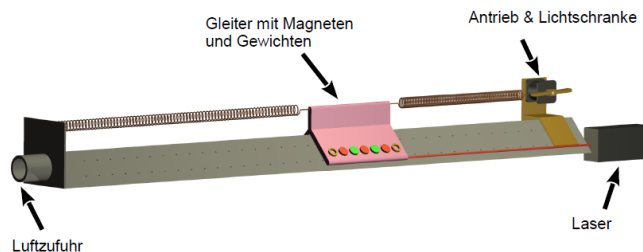


Abbildung RE.4: Schema des im Versuch verwendeten Luftkissengleiters.

## 3. Versuchsdurchführung

Zunächst wird ein Demonstrationsversuch durch den Assistenten durchgeführt, welcher dazu dient, die Software „CassyLab 2“, die zur Aufzeichnung der Messungen benötigt wird, zu erklären. Dabei wird der Luftgleiter mit Messingstücken beladen und es wird eine Probemessung gestartet, die ein Weg-Zeit-Diagramm einer durch eine Auslenkung erzeugten Schwingung aufzeichnet.

Der jetzt folgende Versuch „Resonanz“ kann in zwei Abschnitte unterteilt werden.

Im ersten Teil wird eine freie, gedämpfte Schwingung betrachtet. Hierbei soll der Luftgleiter zunächst mit  $b=0$ , dann mit  $b=1, 3, 5, 7$  Magnetpaaren bestückt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Magnete gleichmäßig und alternierend (d.h. mit abwechselnder Polung) auf den Gleiter verteilt werden sollen. Außerdem müssen alle Leerstellen mit Messingstücken befüllt werden, sodass die Masse des Gleiters bei allen Messungen konstant bleibt.

Es folgt eine Messung mit „Cassylab 2“, die die Parameter der Gleichung

$f(x) = A \cdot \exp(-B \cdot x) \cdot \sin(\frac{360}{C} \cdot x) + D$  (RE.12) aufzeichnen kann. Dabei entspricht der Parameter A der Anfangsamplitude der Schwingung, der Parameter B der Dämpfungskonstante und C der Schwingungsdauer in Sekunden. Der Parameter D entspricht einer eventuellen Abweichung der tatsächlichen Ruhelage von dem gesetzten Nullwert.

Bei jeder der fünf Messungen für fünf verschiedene Werte der Magnetpaare  $b$  müssen die Parameter A, B, C und D dieser Gleichung notiert werden. Außerdem müssen jeweils die Schwingungsdauer am Betriebsgerät und das Bestimmtheitsmaß  $r$  aus „Cassylab 2“ notiert werden.

Im zweiten Teil des Versuchs betrachten wir eine erzwungene Schwingung, welche durch den Motor angeregt wird. Dabei werden zwei Messreihen durchgeführt: Die erste Messreihe wird für  $b=1$ , d.h. für ein Magnetpaar und die zweite Messreihe wird für  $b=5$ , d.h. für fünf Magnetpaare durchgeführt.

Bei jeder Messreihe erfolgen 12 Messungen für jeweils 12 verschiedene Periodendauern des Motors, die zwischen 2,2s und 2,9s liegen müssen. Zu beachten ist hierbei, dass die Messung erst begonnen werden darf, wenn der Einschwingvorgang abgeklungen ist. Jede Messung sollte die Aufzeichnung folgender Werte beinhalten: Maximale und Minimale Auslenkung der Schwingung, Umdrehungsdauer  $T$  des Motors, Umdrehungsdauer  $T$  des Gleiters und die  $\Delta T$  zur Berechnung der Phasenverschiebung  $\phi_0$ .

Aus der minimalen und maximalen Auslenkung der Schwingung kann mithilfe folgender Formel die Amplitude  $A_0$  berechnet werden:

$$A_0 = \frac{A_{max} - A_{min}}{2}$$

#### 4. Auswertung

##### Zur freien, gedämpften Schwingung

- I. Berechnung der Kreisfrequenz  $\omega'$  ( $b$ ) aus den fünf Weg-Zeit-Diagrammen und  $\omega'$ - $b$ -Diagramm

Die Frequenz  $f$  des Gleiters kann mithilfe folgender Formel berechnet werden:  $f = \frac{1}{T}$ . Dabei verwenden wir die von uns gemessenen Werte der Periodendauer  $T$  des Gleiters.

Die Kreisfrequenz  $\omega_0$  der ungedämpften Schwingung lässt sich mit der Formel  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  berechnen. Daraus ergibt sich dann die Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung folgendermaßen:

$$\omega'(b) = \sqrt{\omega_0^2 - b^2} \quad (RE.6)$$

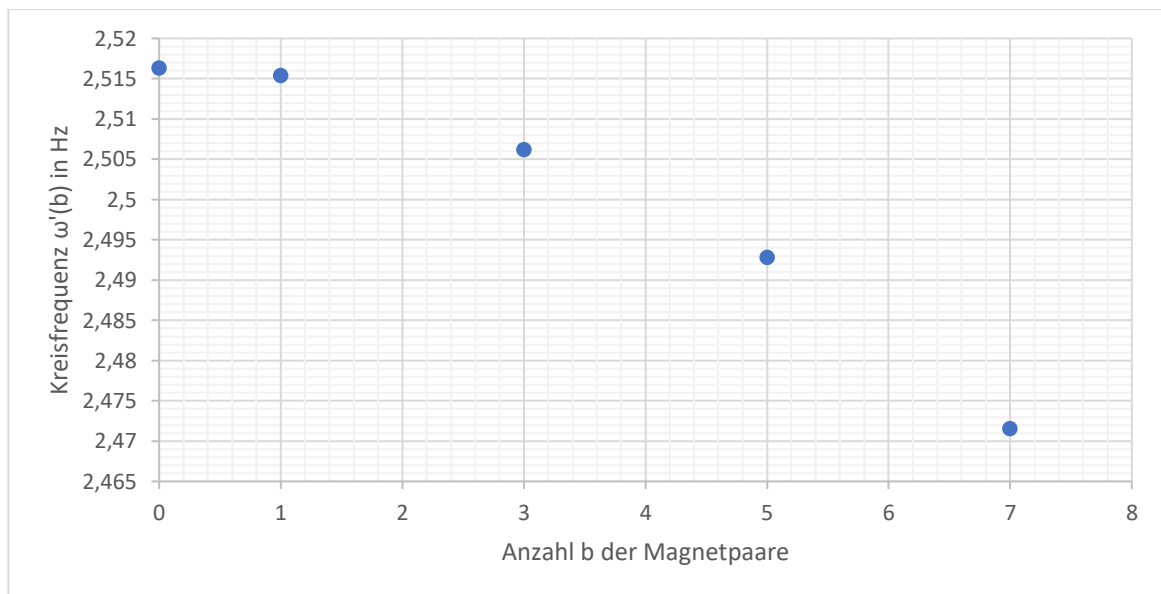
Dabei beschreibt  $b$  die Dämpfungskonstante  $\beta$ .

Es ergeben sich folgende Werte und daraus das zu erstellende Diagramm:

Tabelle 1: Kreisfrequenz für unterschiedliche Anzahl der Magnetpaare

| Anzahl Magnetpaare $b$ | Frequenz $f$ in Hz | Kreisfrequenz des ungedämpften Pendels $\omega_0$ in Hz | Kreisfrequenz des gedämpften Pendels $\omega'(b)$ in Hz |
|------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 0                      | 0,40048            | 2,51629                                                 | 2,51629                                                 |
| 1                      | 0,40106            |                                                         | 2,51533                                                 |
| 3                      | 0,39579            |                                                         | 2,50618                                                 |
| 5                      | 0,38886            |                                                         | 2,49277                                                 |
| 7                      | 0,38279            |                                                         | 2,47151                                                 |

Abbildung 1: Kreisfrequenz  $\omega'$  in Abhängigkeit der Anzahl der Magnetpaar



Aus dem Diagramm wird sichtbar, dass die Werte der Kreisfrequenz  $\omega'(b)$  bei steigender Dämpfung, wie zu erwarten, absinken. Außerdem ist die Kreisfrequenz  $\omega'(0)$ , d.h. die Kreisfrequenz der ungedämpften Schwingung, am größten.

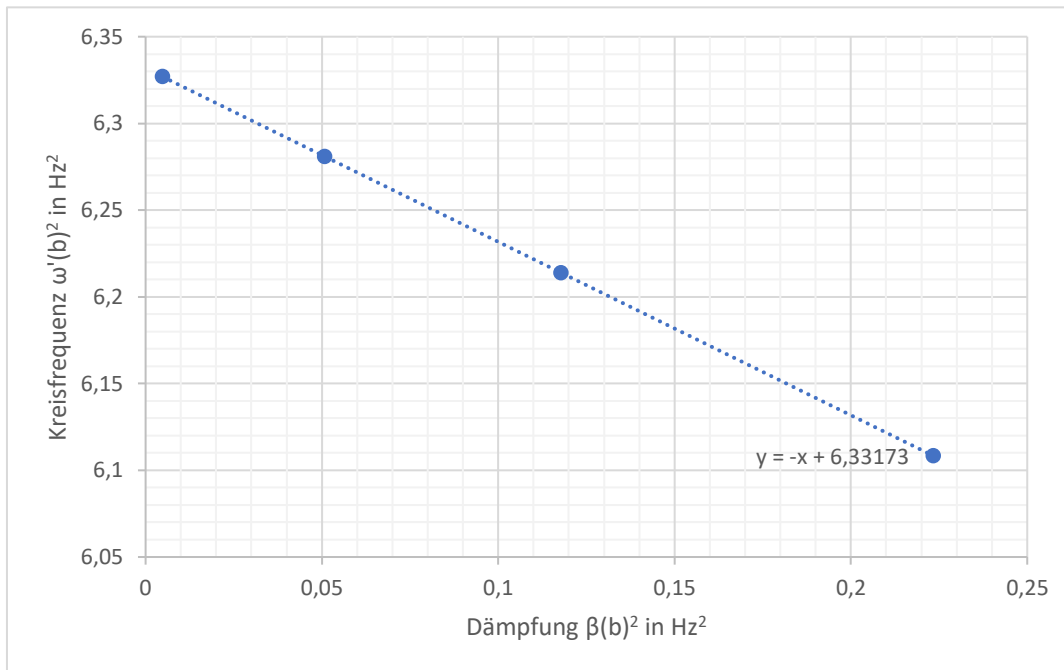
Die Werte der Kreisfrequenzen einer ungedämpften Schwingung sind größer, als die Werte der entsprechenden gedämpften Schwingung. Auch dieser Zusammenhang entspricht unseren Erwartungen, was sich auch mit der Formel  $\omega'(b) = \sqrt{\omega_0^2 - b^2}$  (RE.6) begründen lässt.

Daraus lässt sich ableiten, dass die Dämpfung und die damit verbundene Reibungskraft bei steigender Anzahl der Magnetpaare zunimmt. Daher kann angenommen werden, dass die Dämpfung  $\beta$  proportional zur Anzahl  $b$  der Magnetpaare ist.

Daher kann gesagt werden, dass die Werte den theoretischen Erwartungen entsprechen.

## II. Diagramm $\omega'(b)^2$ gegen $\beta(b)^2$ für $b=1, b=3, b=5, b=7$ und linearer Zusammenhang

Abbildung 4: Zusammenhang Kreisfrequenz  $\omega^2$  und Abklingkonstante  $\beta^2$



Anhand des erstellten Graphen in Abbildung 4 sollte sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Quadrat der Kreisfrequenz und dem Quadrat der Abklingkonstante  $\beta$  ergeben. Da bei unseren Messungen der Messwert für  $b=5$  etwas ungenau ist, muss auch hier beachtet werden, dass dieser nicht auf der Ausgleichsgeraden liegt.

Aus diesem Diagramm kann die ungedämpfte Kreisfrequenz  $\omega_0$  durch den Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der  $\omega^2$ -Achse bestimmt werden. Dabei kann die Funktion dieser Gerade mithilfe von Excel bestimmt werden:  $y = -x + 6,33173$ . Jetzt kann daraus der Schnittpunkt mit der  $\omega^2$ -Achse bestimmt werden:  $y(0) = 6,33173 \text{ Hz}^2$ .

Da  $y(0)$  allerdings nicht  $\omega_0$  angibt, sondern  $\omega_0^2$ , muss dieser Wert zunächst umgerechnet werden:

$$\omega_0^2 = 6,33173 \text{ Hz}^2$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_0^2} = \sqrt{6,33173 \text{ Hz}^2}$$

$$\omega_0 = 2,51629 \text{ Hz}$$

Dieser Wert für  $\omega_0$  entspricht genau dem von uns aufgezeichneten Wert von  $\omega_0=2,51629$ .

### III. Abklingkonstante $\beta(b)$ , $\beta$ -b-Diagramm und aperiodischer Grenzfall

Die Abklingkonstante  $\beta$  entspricht B der von uns aufgezeichneten Messwerte der Fitfunktion und soll nun in folgendem Schaubild in Abhängigkeit der Magnetpaaranzahl veranschaulicht werden.

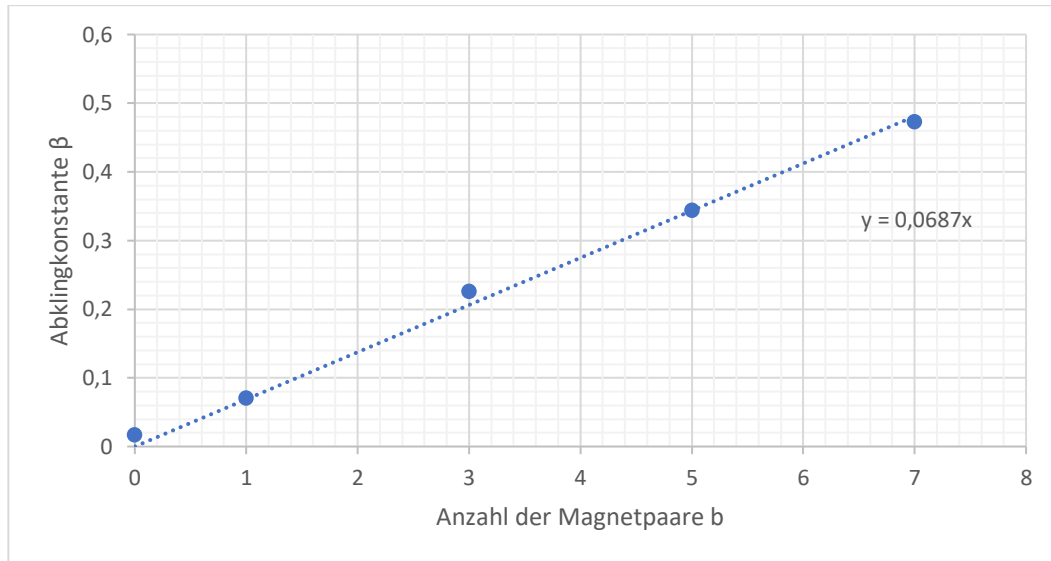


Abbildung 5: Abklingkonstante  $\beta$  in Abhängigkeit der Magnetpaaranzahl b

Die Ausgleichsgerade kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n y_i \cdot y_i}$$

$$\begin{aligned} \beta(b) &= \frac{b_1 \cdot \beta(b_1) + b_2 \cdot \beta(b_2) + b_3 \cdot \beta(b_3) + b_4 \cdot \beta(b_4) + b_5 \cdot \beta(b_5)}{b_1 \cdot b_1 + b_2 \cdot b_2 + b_3 \cdot b_3 + b_4 \cdot b_4 + b_5 \cdot b_5} \\ &= \frac{1 \cdot 0,06975 + 3 \cdot 0,22538 + 5 \cdot 0,3433 + 7 \cdot 0,47262}{1 + 3 + 5 + 7} \\ &= 0,068699131 \cdot b \end{aligned}$$

Daraus resultiert für die Ausgleichsgerade  $\beta(b) = 0,0687 \cdot b$ , was auch der von Excel berechneten Ausgleichsgeraden entspricht.

Nun soll durch Extrapolation die ganzzahlig gerundete Anzahl b der Magnetpaare bestimmt werden, bei denen kritische Dämpfung (aperiodischer Grenzfall) auftritt. Dabei wird der Wert für  $\omega_0$  verwendet, der aus Abbildung 4 ( $\omega^2$ - $\beta^2$ -Diagramm) bestimmt wurde.

Kritische Dämpfung tritt auf, wenn der Grenzfall  $\omega_0^2 = \beta^2$  eintritt. In diesem Fall kann der Gleiter nicht mehr um seine Ruhelage schwingen, da die Dämpfung zu groß ist. Der Gleiter versucht so schnell wie möglich zurück in seine Ruhelage zurück zu kehren.

Um die Anzahl b der Magnetpaare zu berechnen, wird nun  $\omega_0^2 = \beta^2$  gesetzt und daraus dann ein Wert für b errechnet:

$$\begin{aligned} \omega_0^2 &= 6,33173 \text{ Hz}^2 & \beta(b) &= 0,0687 \cdot b \\ 6,33173 \text{ Hz}^2 &= 0,0687 \text{ Hz}^2 \cdot b^2 \\ b^2 &= \frac{6,33173 \text{ Hz}^2}{(0,0687)^2} \end{aligned}$$

$$b = \sqrt{\frac{6,33173 \text{ Hz}^2}{(0,0687)^2}} = 36,62774$$

Daraus lässt sich folgern, dass in unserem Fall 37 Magnetpaare notwendig wären, sodass es zu kritischer Dämpfung und somit dem aperiodischen Grenzfall kommen könnte.

### Zur erzwungenen Schwingung

- I. Diagramme für die Amplitude  $A_0$  und die Phasendifferenz  $\phi_0$  als Funktion der Erregerkreisfrequenz  $\omega_e$  jeweils für die Anzahl der Magnetpaare  $b=1$  und  $b=5$

Zunächst wird die Erregerkreisfrequenz mit folgender Formel berechnet:  $\omega_e = \frac{2\pi}{T_{Motor}}$

Mithilfe der Erregerkreisfrequenz  $\omega_e$  lässt sich nun die Phasenverschiebung  $\phi_0$  berechnen:

$$\phi_0 = \frac{2\pi \cdot \Delta T}{T_{Motor}} = \omega_e \cdot \Delta T \quad (RE.11)$$

Dabei entspricht  $T_{Motor}$  der Umdrehungsdauer des Motors und  $\Delta T$  der Zeitdifferenz zwischen Motordrehung und erzwungener Schwingung.

Die Amplitude  $A_0$  kann mit folgender Formel berechnet werden:  $A_0 = \frac{A_{max} - A_{min}}{2}$

Es ergeben sich daraus die folgenden Werte für  $b=1$  Magnetpaar:

Tabelle 2: Werte für  $A$ -  $\omega_e$ - bzw.  $\phi_0$ -  $\omega_e$ -Diagramm bei einem Magnetpaar

| Umdrehungsdauer<br>$T_{Motor}$ in s | Zeitdifferenz $\Delta T$<br>in s | Amplitude<br>$A_0$ in m | Erregerkreisfrequenz<br>$\omega_e$ in Hz | Phasenverschiebung<br>$\phi_0$ |
|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
| 2,2                                 | 1,044                            | 0,0314                  | 2,85599                                  | 2,98166                        |
| 2,3                                 | 1,036                            | 0,05155                 | 2,73182                                  | 2,83017                        |
| 2,35                                | 1,014                            | 0,067                   | 2,67367                                  | 2,71113                        |
| 2,4                                 | 0,953                            | 0,0975                  | 2,61800                                  | 2,49495                        |
| 2,45                                | 0,845                            | 0,1285                  | 2,56457                                  | 2,16706                        |
| 2,5                                 | 0,576                            | 0,15565                 | 2,51327                                  | 1,44765                        |
| 2,55                                | 0,383                            | 0,13305                 | 2,46399                                  | 0,94371                        |
| 2,6                                 | 0,229                            | 0,09375                 | 2,41661                                  | 0,55340                        |
| 2,65                                | 0,164                            | 0,07205                 | 2,37101                                  | 0,38885                        |
| 2,7                                 | 0,128                            | 0,05815                 | 2,32711                                  | 0,29787                        |
| 2,8                                 | 0,09                             | 0,0425                  | 2,24399                                  | 0,20196                        |
| 2,9                                 | 0,08                             | 0,03375                 | 2,16662                                  | 0,17333                        |

Aus diesen Werten können folgende Diagramme erstellt werden:

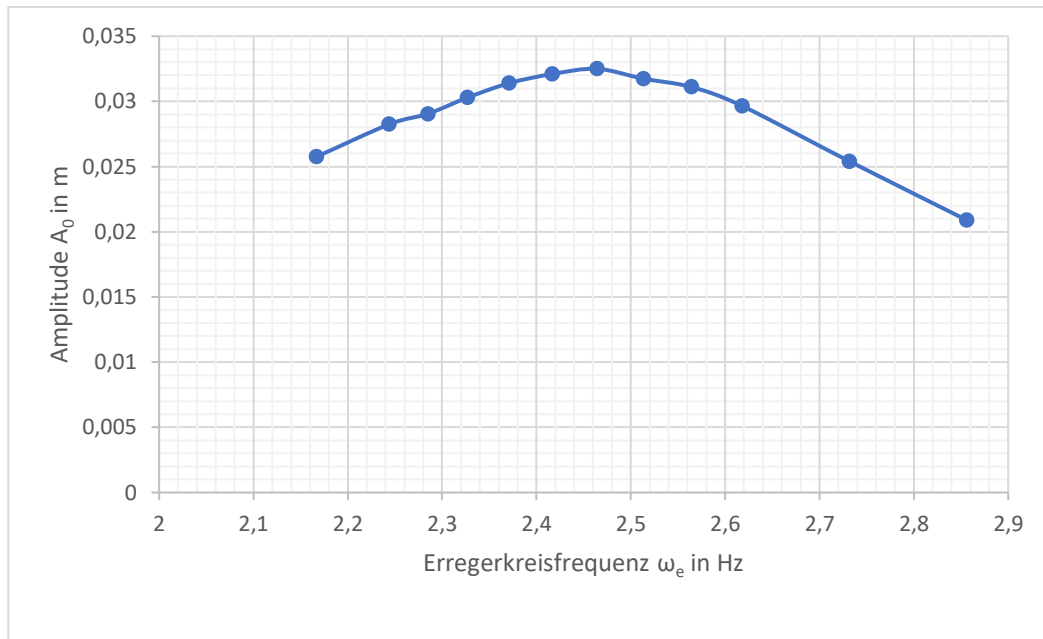


Abbildung 6: Amplitude  $A_0$  in Abhängigkeit der Erregerkreisfrequenz  $\omega_e$

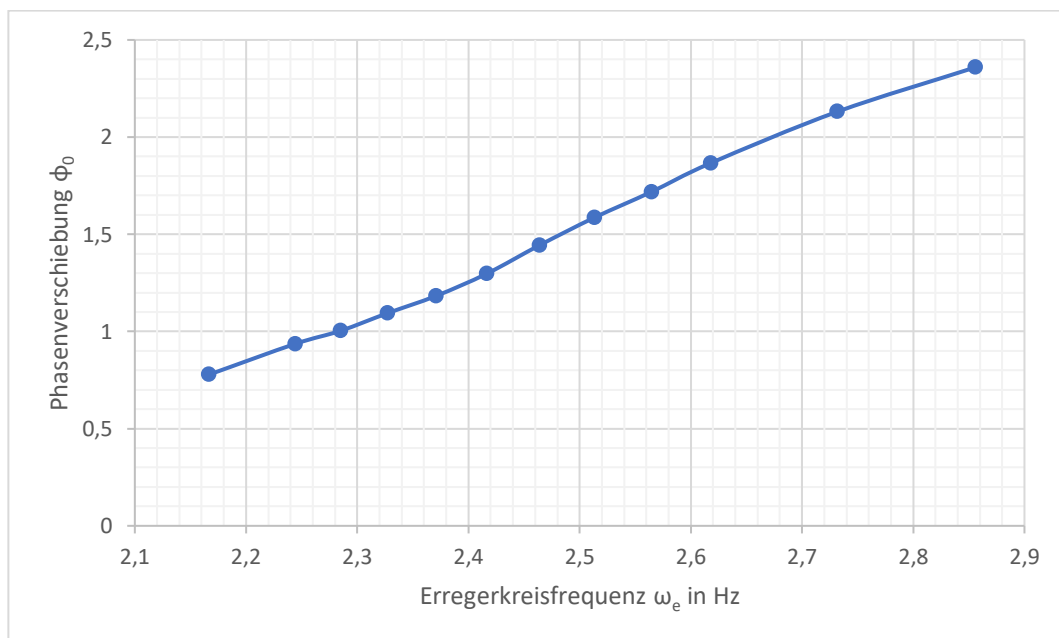


Abbildung 7: Phasenverschiebung  $\phi_0$  in Abhängigkeit der Erregerkreisfrequenz  $\omega_e$

Für  $b=5$  Magnetpaare ergeben sich folgende Werte:

Tabelle 3: Werte für  $A$ -  $\omega_e$ - bzw.  $\phi_0$ -  $\omega_e$ -Diagramm bei fünf Magnetpaaren

| Umdrehungsdauer<br>$T_{\text{Motor}}$ in s | Zeitdifferenz $\Delta T$<br>in s | Amplitude $A_0$ in<br>m | Erregerkreisfrequenz<br>$\omega_e$ in Hz | Phasenverschiebung<br>$\phi_0$ |
|--------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
| 2,2                                        | 0,826                            | 0,0209                  | 2,85599                                  | 2,35905                        |
| 2,3                                        | 0,78                             | 0,0254                  | 2,73182                                  | 2,13082                        |
| 2,4                                        | 0,713                            | 0,02965                 | 2,61799                                  | 1,86663                        |
| 2,45                                       | 0,67                             | 0,0311                  | 2,56457                                  | 1,71826                        |
| 2,5                                        | 0,631                            | 0,03175                 | 2,51327                                  | 1,58588                        |
| 2,55                                       | 0,586                            | 0,0325                  | 2,46399                                  | 1,44390                        |
| 2,6                                        | 0,537                            | 0,0321                  | 2,41661                                  | 1,29772                        |
| 2,65                                       | 0,0499                           | 0,0314                  | 2,37101                                  | 0,11831                        |
| 2,7                                        | 0,47                             | 0,0303                  | 2,32711                                  | 1,09374                        |
| 2,75                                       | 0,439                            | 0,02905                 | 2,28479                                  | 1,00302                        |
| 2,8                                        | 0,417                            | 0,02825                 | 2,24399                                  | 0,93575                        |
| 2,9                                        | 0,359                            | 0,02575                 | 2,16662                                  | 0,77782                        |

Für diese Werte können folgende Diagramme erstellt werden:

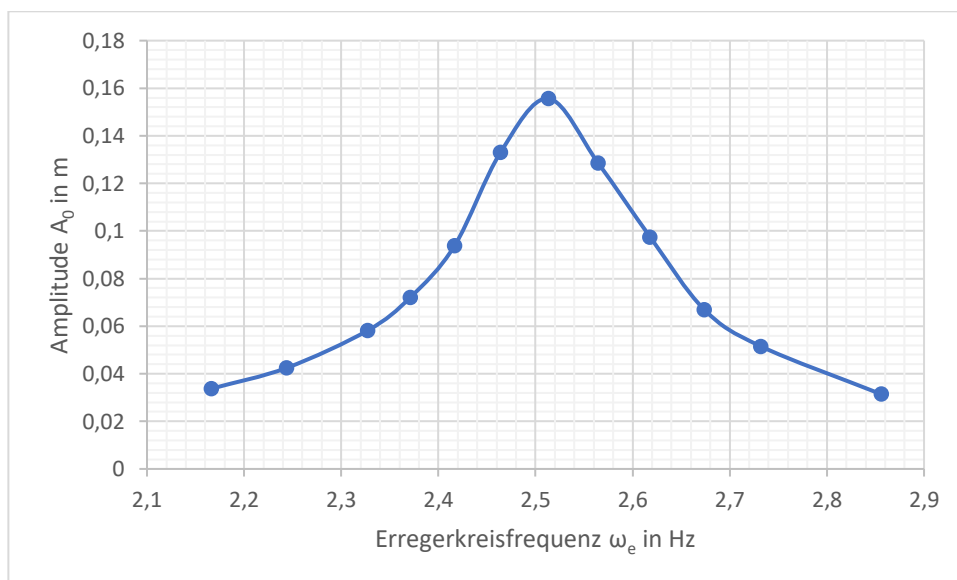


Abbildung 8: Amplitude  $A_0$  in Abhängigkeit der Erregerkreisfrequenz  $\omega_e$

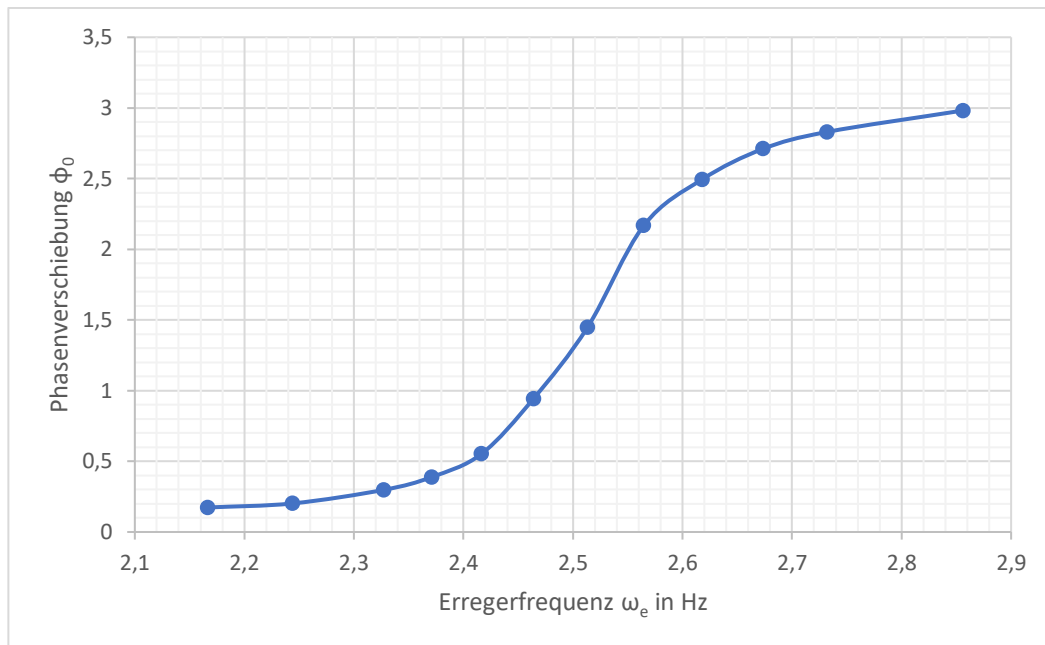


Abbildung 9: Phasenverschiebung  $\phi_0$  in Abhängigkeit der Erregerkreisfrequenz  $\omega_e$

## II. Kreisfrequenz der Resonanzstellen

Diejenige Frequenz, bei der die Amplitude der erzwungenen Schwingung maximal wird, nennt man Resonanzfrequenz  $\omega_R$ , die mit folgender Formel berechnet werden kann:

$$\omega_R = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad (RE.9)$$

Aus dieser Gleichung wird deutlich, dass die Resonanzfrequenz  $\omega_R$  bei größer werdender Dämpfung kleiner wird. Daher kann man davon ausgehen, dass die Resonanzfrequenzen bei steigender Magnetpaaranzahl in dem vorliegenden Versuch sinken.

Aus den Abbildungen 6 und 8, die die Amplitude in Abhängigkeit der Erregerkreisfrequenzen angibt, können die Resonanzfrequenzen bei dem Amplitudenmaximum abgelesen werden:

Für  $b=1$ :  $\omega_R = 2,51 \text{ Hz}$

Für  $b=5$ :  $\omega_R = 2,46 \text{ Hz}$

Für die exakte Berechnung der Resonanzfrequenzen können die Werte der Abklingkonstante  $\beta(b)$ , sowie der Wert der ungedämpften Kreisfrequenz  $\omega_0$  verwendet werden. Es ergeben sich folgende Werte:

Tabelle 4: Messwerte zur Bestimmung der Resonanzfrequenz

| Anzahl der Magnetpaare $b$ | Abklingkonstante $\beta(b)$ | Kreisfrequenz $\omega_0$ in Hz | Resonanzfrequenz $\omega_R$ in Hz |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 0                          | 0,01606                     | 2,51629                        | 2,51619                           |
| 1                          | 0,069747                    |                                | 2,51436                           |
| 3                          | 0,22538                     |                                | 2,49603                           |
| 5                          | 0,3433                      |                                | 2,46901                           |
| 7                          | 0,47262                     |                                | 2,42590                           |

Mithilfe der Formel RE.9 ergeben sich folgende Werte:

Für  $b=1$   $\omega_R = 2,51436$  Hz

Für  $b=5$   $\omega_R = 2,46901$  Hz

Wenn man diese theoretisch zu erwartenden Resonanzfrequenzen mit den aus Abbildung 6 und 8 abgelesenen Resonanzfrequenzen vergleicht, stellt man fest, dass die Werte für  $b=1$  einander fast entsprechen. Für  $b=5$  kann eine minimal größere Abweichung festgestellt werden, was auf Messungenauigkeiten zurückzuführen ist.

Außerdem wird deutlich, dass die Resonanzfrequenzen (mit Ausnahme des Wertes für  $b=5$ ) stetig sinken. Dies ist darin begründet, dass bei höherer Dämpfung (d.h. höhere Anzahl an Magnetpaaren) die Reibungskraft  $F_R$  zwischen Gleiter und Schiene größer wird und dadurch die Amplitude und somit auch die Frequenz sinkt. Dies wird sowohl durch die abgelesenen als auch durch die berechneten Werte deutlich.

## 6. Anhang mit Messwerten

| $\Delta T = \frac{\Phi}{\dot{Q}}$ / s | $T_{\text{Heizer}}$ / s | $T_{\text{Teiler}}$ / s | $b$     | $A_{\text{max}}$ | $A_{\text{min}}$          | $A_0 = \frac{A_{\text{max}} + A_{\text{min}}}{2}$ | $D$    | $r$ |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------|------------------|---------------------------|---------------------------------------------------|--------|-----|
| 0                                     | 2,488                   | 0                       | 0,2305  | 0,01606          | <del>2,497</del><br>2,488 | 0,0009053                                         | 0,3996 |     |
| 0                                     | 2,494                   | 1                       | 0,33846 | 0,058747         | 2,4934                    | 0,0040843                                         | 0,3997 |     |
| 0                                     | 2,505                   | 3                       | 0,2351  | 0,22538          | 2,5266                    | 0,0043433                                         | 0,3980 |     |
| 0                                     | 2,505 <sup>5</sup>      | 3                       | 0,25824 | 0,22312          | 2,5434                    | 0,0047693                                         | 0,3970 |     |
| 0                                     | 2,751                   | 5                       | 0,21373 | 0,3433           | 2,5716                    | 0,0046042                                         | 0,3945 |     |
| 0                                     | 2,603                   | 7                       | 0,16336 | 0,47202          | 2,6124                    | 0,0037676                                         | 0,3944 |     |

| $\Delta T$ / s | $T_{\text{Heizer}}$ / s | $T_{\text{Teiler}}$ / s | $b$ | $A_{\text{max}}$            | $A_{\text{min}}$ | $A_0 = \frac{A_{\text{max}} + A_{\text{min}}}{2}$ |        |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-----|-----------------------------|------------------|---------------------------------------------------|--------|
| 0,826          | 2,200                   | 2,109                   | 5   | 0,0243<br><del>0,0243</del> | -0,0175          | 0,0209                                            |        |
| 0,780          | 2,300                   | 2,293                   | 5   | 0,0298                      | -0,0210          | 0,0254                                            |        |
| 0,713          | 2,400                   | 2,298                   | 5   | 0,0330                      | -0,0263          | 0,02966                                           | x 2,45 |
| 0,531          | 2,500                   | 2,300                   | 5   | 0,0370                      | -0,0265          | 0,03175                                           | x 2,55 |
| 0,537          | 2,600                   | 2,599                   | 5   | 0,0355                      | -0,0287          | 0,0327                                            | x 2,65 |
| 0,470          | 2,700                   | 2,698                   | 5   | 0,0363                      | -0,0243          | 0,0303                                            | x 2,75 |
| 0,417          | 2,800                   | 2,799                   | 5   | 0,0330                      | -0,0235          | 0,02825                                           |        |
| 0,359          | 2,900                   | 2,901                   | 5   | 0,0305                      | -0,0210          | 0,02575                                           |        |

Resonanz  
Luisa Klingner, Nina Koder  
24.2.19  
Prof. Lukas Woltz

Abbildung 9: Messwerte

| $\Delta T / \Phi$ | $T_{\text{Heizer}}$ | $T_{\text{Teiler}}$ | $b$ | $A_{\text{max}}$ | $A_{\text{min}}$ | $A_0 = \frac{A_{\text{max}} + A_{\text{min}}}{2}$ |  |
|-------------------|---------------------|---------------------|-----|------------------|------------------|---------------------------------------------------|--|
| 0,439             | 2,750               | 2,747               | 5   | 0,0358           | -0,0223          | 0,02905                                           |  |
| 0,499             | 2,650               | 2,649               | 5   | 0,0358           | -0,0270          | 0,0314                                            |  |
| 0,586             | 2,550               | 2,550               | 5   | 0,0370           | -0,0230          | 0,0325                                            |  |
| 0,670             | 2,450               | 2,448               | 5   | 0,0365           | -0,0257          | 0,0307                                            |  |

| $\Delta T$ / s | $T_{\text{Heizer}}$ / s | $T_{\text{Teiler}}$ / s | $b$ | $A_{\text{max}}$                      | $A_{\text{min}}$ | $A_0 = \frac{A_{\text{max}} + A_{\text{min}}}{2}$ |        |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-----|---------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------|--------|
| 1,044          | 2,200                   | 2,200                   | 1   | 0,0375                                | -0,0253          | 0,0314                                            |        |
| 1,036          | 2,300                   | 2,298                   | 1   | 0,0587                                | -0,0448          | 0,05155                                           | x 2,35 |
| 0,953          | 2,400                   | 2,399                   | 1   | 0,1028                                | -0,0922          | 0,0975                                            | x 2,45 |
| 0,926          | 2,500                   | 2,500                   | 1   | 0,1623                                | -0,1490          | 0,15565                                           | x 2,55 |
| 0,229          | 2,600                   | 2,598                   | 1   | 0,1015                                | -0,0860          | 0,09375                                           | x 2,65 |
| 0,123          | 2,700                   | 2,700                   | 1   | 0,0643                                | -0,0520          | 0,05815                                           |        |
| 0,090          | 2,800                   | 2,797                   | 1   | 0,0503                                | -0,0347          | 0,0425                                            |        |
| 0,080          | 2,900                   | 2,899                   | 1   | 0,0415                                | -0,0260          | 0,03375                                           |        |
| 1,014          | 2,350                   | 2,349                   | 1   | 0,0745<br>0,1355<br><del>0,1408</del> | -0,0595          | 0,067                                             |        |
| 0,845          | 2,450                   | 2,451                   | 1   | 0,1403                                | -0,1215          | 0,1285                                            |        |
| 0,783          | 2,550                   | 2,549                   | 1   | 0,1403                                | -0,1258          | 0,1305                                            |        |
| 0,164          | 2,650                   | 2,651                   | 1   | 0,0783                                | -0,0658          | 0,07205                                           |        |

24.2.19  
Nina Koder  
Luisa Klingner  
Prof. Lukas Woltz

Abbildung 10: Messwerte