

Kapitel 1

Hinweise zur Laborarbeit

1.1 Laborordnung

Diese Laborordnung dient dazu, einen reibungslosen und unfallsicheren Laborbetrieb zu ermöglichen. In den Laboren darf nur arbeiten, wer sich an diese Laborordnung hält. Mit der Aufnahme einer Arbeit in einem der Labore erkennen Sie diese Laborordnung an.

1.1.1 Allgemeines

- Personen, die nicht im Besitz der erforderlichen körperlichen und geistigen Voraussetzungen sind, kann die Arbeit im Labor nicht gestattet werden.
- Schwangere dürfen den Laborbereich nur eingeschränkt nutzen (Rücksprache mit dem Laborpersonal).
- Das Essen, Trinken und Rauchen im Labor ist unzulässig.
- Unbefugten ist der Zutritt zu den Laboratorien verboten.
- Die Einrichtungen des Labors sind schonend zu behandeln.
- Jegliche Geräte etc., die nicht zum Bestand des Labors gehören, dürfen nur mit Genehmigung der Laborleitung benutzt werden.
- Nicht nur im eigenen Interesse sind die Sicherheitsbestimmungen streng zu beachten. Personenschäden durch Unfall unterliegen den Haftungsgrundsätzen der Hochschule.
- Die Flucht- und Rettungswege sind freizuhalten. Die Brandschutzordnung ist zu beachten.

1.1.2 Schutzmaßnahmen und Verhaltensregel

- Die Laboratorien sind sauber und in einem ordnungsgemäßen Zustand zu halten. Der Fußboden ist von abgestellten Gegenständen freizuhalten. Die Brandlasten sind auf ein Minimum zu begrenzen.
- Der Arbeitsplatz ist jeweils nach Beendigung der Arbeit in ordnungsgemäßigem Zustand (sauber und aufgeräumt) zu verlassen.

- Nicht isolierte Teile können Spannung führen! Daher ist es notwendig, die entsprechenden Unfallverhütungs- und VDE-Vorschriften zu beachten (einzusehen in der HS-Bibliothek).
- Versuchsauf- und -umbau dürfen nur im spannungslosen Zustand durchgeführt werden.
- Zur sicheren Durchführung von Praktikumsversuchen gehört auch eine ausreichende Vorbereitung. Erkennbar nicht ausreichende Kenntnisse oder Vorbereitung führen zum Ausschluss vom Versuch oder aus dem Labor.
- Nach Versuchsende sind alle Geräte an ihren ursprünglichen Standort zu bringen. Defekte Geräte sind sofort dem Aufsichtspersonal zu melden.

1.1.3 Datenschutz

- Verwenden Sie nur die für die jeweilige Aufgabenstellung benötigte und Ihnen genannte Software.
- Lassen Sie keine Software laufen, die als Angriff auf andere Rechner angesehen werden kann. (Port-Scans führen bei manchen Rechnern im HS-/RUB-Netz "automatisch" zu einem Strafantrag.)
- Die in den Laborbereichen zur Verfügung gestellten Daten und Datenträger, sowie alle Programme unterliegen dem Daten- bzw. dem Urheberschutz. Sie dürfen weder Dritten zugänglich gemacht werden, noch zu anderen als Ausbildungszwecken verwendet werden.
- Zugriffe auf das HS-Netzwerk und auf das Internet sind ausdrücklich nur zu wissenschaftlichen und zu Lehrzwecken gestattet. Halten Sie sich ganz streng an diese Bedingung. Zuwiderhandlungen verletzen den Wissenschaftsnetzvertrag der HS Bochum.
- Vermeiden Sie auf jeden Fall das Laden / Betrachten von Inhalten, das diese Bedingung verletzt.
- Zuwiderhandlungen gegen die genannten Bedingungen führen zum Ausschluss aus dem Labor. Sie können insbesondere im Zusammenhang mit Netz- und Softwarenutzung und Datenschutz auch Strafverfahren zur Folge haben!

1.1.4 Notfalleinrichtungen

- Zu den Notfalleinrichtungen gehören Handfeuerlöscher, Löschdecke, Notdusche, Augendusche, Hauptschalter für Elektroversorgung, Verbandkästen.
- Alle Notfalleinrichtungen dürfen weder verstellt noch verhängt werden. Sie sind gut erkennbar und frei zugänglich zu halten.
- Alle Beschäftigten müssen die Standorte der Notfalleinrichtungen kennen und über ihre Funktion unterrichtet sein.

- Handfeuerlöscher, die benutzt oder auch nur angebraucht wurden, sowie beschädigte (auch bei beschädigter Plombe) sind zwecks Austauschs umgehend beim internen Gebäudeservice zu melden (Tel.: 02056 5848-16701 bzw. 02056 5848 16700).

1.1.5 Erste Hilfe-Leistung

- Bei allen Hilfeleistung auf die eigene Sicherheit achten.
- Bei Unfällen mit leichten Verletzungen ist der Ersthelfer zu kontaktieren. Bei Unfällen mit schwerwiegenden Verletzungen sowie mit Verletzungen, deren Art und Schwere nicht eingeschätzt werden kann, ist unverzüglich ein Notarzt zu alarmieren und ein Ersthelfer zu kontaktieren.
- Bis zum Eintreffen des Notarztes Erste Hilfe leisten.

1.1.6 Notrufnummer (Feuerwehr / Krankentransport / Polizei)

- Leitwarte Bochum intern (Festnetz): 3333
- Leitwarte Bochum extern (Mobil): 0234-322 33 34

1.1.7 Entsorgung

- Die Entsorgung von Gefahrstoffen und Elektronikschrott erfolgt durch den internen Gebäudeservice (Tel.: 02056 5848-16701 bzw. 02056 5848 16700).

1.2 Hinweise zur Sicherheit

Die Arbeit im Labor erfordert im besonderen Maße Ihre Sorgfalt und Vorsicht. Unbeschadet der in der Laborordnung festgeschriebenen Verhaltensregeln sind die folgenden Hinweise für Sie für *jeden* Versuch wichtig:

- Prüfen Sie zu **Ihrer eigenen Sicherheit** die Funktion des **Not-Aus-Schalters** an Ihrem Labortisch (bei nicht funktionierendem Not-Aus-Schalter rufen Sie den/die Betreuer/in).
- Beachten Sie: an Ihrem Labortisch befinden sich Steckdosen, die **nicht über Not-Aus-Schalter gesichert** sind (siehe Kennzeichnung).
- Prüfen Sie zu **Ihrer eigenen Sicherheit** die Funktion des **Fehlerstrom- (FI-) Schutzschalters** an Ihrem Labortisch (bei nicht funktionierendem FI-Schutzschalter rufen Sie den/die Betreuer/in).

Kapitel 2

Versuch: Rollenfahrbahn

2.1 Ziel

Aus Messungen zu einer geradlinig gleichmäßig beschleunigten Bewegung auf einer Rollenfahrbahn soll die Fallbeschleunigung g bestimmt werden.

2.2 Theorie

Im Erdschwerefeld ergibt sich eine senkrecht wirkende äußere Kraft auf eine gegebene schwere Masse m_s gemäß:

$$F_g = m_s g \quad (2.1)$$

mit g der Fallbeschleunigung, einer ortsabhängigen Konstanten. Diese Konstante soll im vorliegenden Versuch bestimmt werden. Gleichzeitig widersetzt sich jede träge Masse m_t einer Änderung ihres Bewegungszustands durch eine Trägheitskraft:

$$F = \dot{p} = m_t \dot{v} + \dot{m}_t v \quad (2.2)$$

Für zeitlich konstante Massen reduziert sich das auf:

$$F = m_t a \quad (2.3)$$

Schwere und träge Masse sind ihrem Zahlenwert nach stets identisch. Die Fallbeschleunigung g kann, indem man den Aktionssatz verwendet (also Trägheitskräfte und äußere Kräfte gleichsetzt) grundsätzlich einfach durch die Bestimmung von a im freien Fall bestimmt werden. Um den Anspruch an die Messtechnik zu reduzieren, kann auf verschiedene Weisen die wirksame Beschleunigung reduziert werden. Im vorliegenden Versuch wird nur ein Teil der Gesamtmasse wirksam als schwere Masse, so dass man erhält:

$$(m_1 + m_2)a = m_2 g \quad (2.4)$$

Das wird erreicht, indem sich m_1 entlang einer Äquipotentialfläche des Erdschwerefelds bewegt (waagrecht), während sich m_2 in Richtung der Feldlinien des Erdschwerefelds bewegt (senkrecht). Dass beide ihre Beschleunigung als eine effektive Gesamtmasse erfahren wird erzwungen durch die Verbindung beider über einen Faden, der modelliert wird als masselos, unendlich steif gegen Längenänderung, und unendlich nachgiebig für Verbiegung.

2.3 Aufbau

Der Versuch wird aufgebaut ausgehend von einer LEYBOLD DIDACTIC (LD) Rollenfahrbahn, bestehend aus einem Aluminium Strangpress-Profil das mit Hilfe von drei verstellbaren Füßen waagerecht ausgerichtet werden kann. Hierzu werden sog. Libellen verwendet (kleine Wasserwaagen, die in zwei Achsen sensitiv sind). In das Profil eingeformt ist eine Schiene mit 45 mm Spurweite, auf der ein Wagen mit zwei starren, kugelgelagerten Achsen eine effektiv eindimensionale Bewegung ausführen kann.

An dem Wagen kann ein Faden befestigt werden, der am Ende der Schiene über ein ebenfalls kugelgelagertes Kunststoffrad umgelenkt werden kann, so dass im Erdschwerefeld mit zunächst unbekannter Fallbeschleunigung g eine Schwerkraft effektiv (nach Umlenkung) waagerecht auf den Wagen wirken kann. Das Kunststoffrad ist ausgeformt als Inkrementalgeberrad für eine Lichtschranke, die in die Halterung integriert ist. Über das Messsystem LD SENSOR CASSY II kann der Weg, den der Faden zurücklegt, gemessen werden.

Alternativ ist eine Messung der Bewegung durch zwei Kunststoffbahnen möglich, die seitlich am Wagen befestigt sind, und die sich durch eine zweite, seitlich angebrachte Lichtschranke bewegen, während der Wagen diese Lichtschranke passiert. Auch diese Lichtschranke wird durch das LD SENSOR CASSY II ausgewertet.

Der Wagen kann durch Zusatzgewichte beschwert werden, so dass die Masse m_1 variiert werden kann. Am Ende des Fadens, jenseits der Umlenkrolle, kann die Masse m_2 ebenfalls durch Zusatzgewichte variiert werden. Stellen Sie sicher, dass der Anschlag des Rollwagens so eingestellt ist, dass diese Masse m_2 während des Versuchs den Fußboden nicht erreicht.

Aufgabe 1

Sie finden den Aufbau weitgehend vorbereitet vor. Stellen Sie sicher, dass er wie erwartet funktioniert und ausgerichtet ist. Fertigen Sie eine Skizze an.

2.4 Auswertungsstrategien

Es stehen zwei Methoden der Bewegungsmessung zur Verfügung. Beide sollen im Rahmen ihrer experimentellen Möglichkeiten verglichen werden.

2.4.1 Lichtschranke—Inkrementalgeber

Das CASSY zeichnet mit konstanter, aber einstellbarer Zeitbasis den zurückgelegten Weg auf. Das schrittweise experimentelle Vorgehen ist:

- Das SENSOR-CASSY 2 wird aktiviert.
- Die Steuerungssoftware CASSY LAB 2 wird gestartet.
- Mit F5 werden angeschlossene CASSY-Module angezeigt.
- Es wird für den “Timer S” die Einstellung “Weg s ($\Delta s = \pm 1$ mm)” ausgewählt.
- Es wird für den “Timer S” die “Spannungsquelle $S = 1$ ” ausgewählt. Es wird zusätzlich die Funktion Umschalten während automatischer Aufnahme ausgewählt (dadurch wird der Haltemagnet mit dem Start der Zeitmessung *ausgeschaltet*).
- Es werden im “Rechner” die Optionen “Zeitliche Ableitung” $\rightarrow$ “Geschwindigkeit” und $\rightarrow$ “Beschleunigung” ausgewählt.

- Es wird eine sinnvolle Messzeit und ein sinnvolles Messintervall eingestellt.

Aufgabe 2

Überlegen Sie, woher Sie eine sinnvolle Messzeit und ein sinnvolles Messintervall erhalten. Geben Sie Ihre Wahl an und begründen Sie.

Für die Auswertung benötigen wir die Beschleunigung a ; die Wegdaten müssen also weiter aufbereitet werden. Hierfür gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten.

Zum ersten die (zweifache) numerische Ableitung der Wegdaten (das ist es auch, was das CASSY tut, wenn man zusätzlich die Aufzeichnung der Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungsdaten auswählt).

Aufgabe 3

Führen Sie auf diese Weise eine Messung durch, und zeichnen Sie Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung durch das CASSY auf. Wiederholen Sie die Messung mit stark unterschiedlichen Einstellungen für die Zeitbasis. Stellen Sie die Ergebnisse im CASSY LAB gemeinsam dar, machen Sie einen *Screenshot* und speichern Sie ihn. Kopieren Sie die Ergebniss nach EXCEL und führen Sie die numerischen Ableitungen selbst aus. Vergleichen Sie mit dem Ergebnis aus CASSY LAB. Wir erhalten auf diese Weise eine Beschleunigungskurve, unterstellen aber eine konstante Beschleunigung. Wählen Sie einen sinnvollen Datenbereich aus, und mitteln Sie die erhaltenen Beschleunigungswerte. Überlegen und begründen Sie: Wenn Sie so vorgehen müssten, welche Zeitbasis würden Sie für am sinnvollsten halten?

Zum zweiten können wir anhand der CASSY-Daten für die Geschwindigkeit einen linearen Fit machen, oder anhand der Rohdaten (für den Ort) einen quadratischen Fit. Der Vorteil dabei ist, dass die Steigungen nicht lokal zwischen zwei Messpunkten bestimmt werden, sondern global über alle vorhandenen Datenpunkte.

Aufgabe 4

Kopieren Sie die Geschwindigkeitsdaten nach EXCEL und verwenden Sie die Funktionalitäten der Tabellenkalkulation, um eine lineare Regression *selbst* durchzuführen. Vergleichen Sie mit dem Ergebnis, das die “eingebaute” lineare Regression von EXCEL liefert. Schließen Sie ausgehend von diesem Ergebnis auf a und damit auf g . Verwenden Sie nun die “eingebaute” polynomiale Regression von EXCEL, begrenzen Sie die Ordnung auf zwei. Schließen Sie ausgehend von diesem Ergebnis auf a und damit auf g . Vergleichen Sie mit den zuerst erhaltenen Ergebnissen, und auch mit der Beschleunigung, die aus zweifacher numerischer Ableitung resultierte.

2.4.2 Lichtschranke—Geberfahnen

Die Lichtschranke liefert jeweils einen Zeitwert für den ersten und zweiten Beginn und Ende der Verdeckung. Das schrittweise experimentelle Vorgehen ist:

- Es wird für die “Timer-Box” die Einstellung “Pegel F ” ausgewählt.
- Es wird eine sinnvolle Messzeit und ein sinnvolles Messintervall eingestellt. Für diesen Versuch muss das Intervall sehr kurz gewählt werden (bspw. 10 μs), um die

wenigen verwendeten Datenpunkte möglichst exakt zu kennen.

- Als Datenpunkte werden nur die Zeiten des Wechsels zwischen schwarz/weiß ausgegeben, jeweils gemeinsam mit dem Pegel 0/1.

Aus der bekannten Geometrie der beiden Fahnen (Breite und Abstand zueinander) erhält man vier Zeiten zu vier Ortspunkten bekannten Abstands (allerdings ohne Bezug zum Ausgangsort der Bewegung). Bereits aus drei Orten könnte man die Krümmung der Ortskurve bestimmen, also die Beschleunigung. Im Prinzip liefern uns zwei Fahnen also bereits mehr als genug Daten zur Bestimmung der Fallbeschleunigung.

Aufgabe 5

Bestimmen Sie die relevanten Geometriedaten mit dem Messschieber, Gliedermessstab oder Maßband. Begründen Sie Ihre Wahl des Messgeräts und notieren Sie die Ergebnisse.

Aufgabe 6

Kopieren Sie die genannten vier Messpunkte in EXCEL. Verwenden Sie die Funktionalitäten der Tabellenkalkulation, um automatisiert die beiden zueinander gehörigen Zeitdifferenzen (Geberfahnen) zu berechnen, und gemeinsam mit der zuvor gemessenen Breite zu zwei Geschwindigkeiten zu verarbeiten. Berechnen Sie dann die Zeitdifferenz zwischen diesen beiden Einzelmessungen (bspw. zwischen den Mitten der beiden Verdunklungen) und berechnen Sie eine Beschleunigung.

Aufgabe 7

Verwenden Sie nun alternativ alle vier Messpunkte gemeinsam und führen Sie eine polynomiale Regression der Ordnung zwei durch (EXCEL-Funktionalität).

Aufgabe 8

Vergleichen Sie alle betrachteten Methoden. Treffen Sie eine sachlich begründete Wahl, wie Sie für den Rest des Experiments vorgehen wollen und dokumentieren Sie Ihre Entscheidung.

2.5 Durchführung

Aufgabe 9

Verwenden Sie die zuvor ausgewählte, beste Methode der Beschleunigungsbestimmung. Führen Sie Messungen durch für $m_1 = 500$ g und $m_1 = 1000$ g, sowie $m_2 = 10$ g, 50 g und 100 g (insgesamt sechs Messungen). Messen Sie *alle* tatsächlich verwendeten Massen möglichst exakt aus, und notieren Sie sie mit ihrer Unsicherheit.

2.6 Ergebnis

Aufgabe 10

Werten Sie Ihre Ergebnisse aus mit dem Ziel, die Fallbeschleunigung zu bestimmen. Führen Sie eine Fehlerrechnung durch, unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Massen, sowie in den Geometriedaten (falls Sie mit Geberfahnen arbeiten). Notieren Sie die relevanten Formeln.

Aufgabe 11

Begründen Sie, zu welchem Ergebnis Sie für die Fallbeschleunigung kommen. Halten Sie alle Einzelversuche für in gleicher Weise aussagefähig? Falls Ihnen einzelne weniger aussagekräftig vorkommen als andere, begründen Sie.

2.7 Fazit

Aufgabe 12

Formulieren Sie das Fazit Ihres Versuchs, ausgehend vom eingangs formulierten Ziel.

Kapitel 3

Versuch: Drehschwinger

3.1 Ziel

Anhand von Messungen der Schwingungsdauer starrer Körper auf einer Drillachse sollen Trägheitsmomente bestimmt werden. Mit der selben Anordnung soll der STEINERSche Satz bestätigt werden. Es soll die Dämpfung des Systems qualitativ untersucht werden.

3.2 Theorie

Für einen Drehschwinger, in dem ausschließlich die Winkelrichtgröße D bspw. einer Spiralfeder als rückstellendes Moment wirkt, und der ein Trägheitsmoment J aufweist, gilt die Bewegungsgleichung formuliert im Auslenkungswinkel φ :

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = 0 \quad \text{mit:} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{D}{J}} \quad (3.1)$$

der Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems und:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (3.2)$$

der zugehörigen Periodendauer. Diese Differentialgleichung wird durch eine harmonische Schwingung gelöst:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \sin(\omega_0 t - \psi_0) \quad (3.3)$$

mit φ_0 der Amplitude der Schwingung und ψ_0 einer Phasenverschiebung. In diesem Experiment werden wir Dämpfungseffekte und die zeitliche Abnahme der Amplitude nur qualitativ untersuchen. Aus Gleichungen (3.1) und (3.2) folgt:

$$J = \frac{T_0^2}{4\pi^2} D \quad (3.4)$$

so dass aus der Messung der Periodendauer und Kenntnis der Winkelrichtgröße Trägheitsmomente direkt bestimmt werden können. Die Winkelrichtgröße ergibt sich dabei aus der Proportionalität:

$$T = D\varphi \quad (3.5)$$

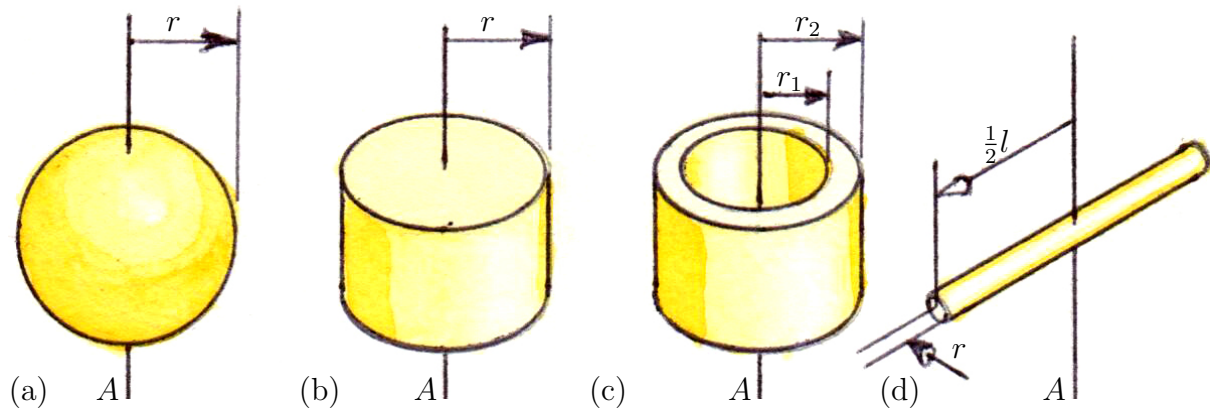


Abbildung 3.1: Trägheitsmomente häufig verwendeter starrer Körper. (a) Vollkugel, (b) Vollzylinder, (c) Hohlzylinder, (d) dünner Stab. Relevante Geometrieparameter sind markiert, A ist jeweils die Drehachse.

mit T dem Drehmoment, das sich für einen gegebenen Auslenkungswinkel φ statisch ergibt aus (bspw. als Kraft gemessen senkrecht zum Hebelarm des Kraftangriffspunkts):

$$\mathbf{T} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad \text{bzw.:} \quad T = rF \quad \text{für:} \quad \mathbf{r} \perp \mathbf{F} \quad (3.6)$$

Unabhängig davon kann für einfache geometrische Körper mit bekannter, homogener volumenbezogener Masse ρ das Trägheitsmoment aus Geometrieinformationen und der Masse des Körpers bestimmt werden. Es gilt für Körper mit Masse m (vgl. Abb. 3.1):

- Vollkugel mit Radius r (Drehung um eine Schwerpunktsachse):

$$J = \frac{2}{5}mr^2 \quad (3.7)$$

- Vollzylinder mit Radius r (Drehung um die Symmetrieachse):

$$J = \frac{1}{2}mr^2 \quad (3.8)$$

- Dünner Stab mit Länge l und Radius $r \ll l$
(Drehung quer zur Symmetrieachse durch den Schwerpunkt):

$$J = \frac{1}{12}ml^2 \quad (3.9)$$

Alle diese Trägheitsmomente beziehen sich auf hochsymmetrische Drehachsen und Schwerpunktsachsen. Unter Verwendung des STEINERSchen Satzes kann aus Kenntnis des Trägheitsmoments J_A für eine Schwerpunktsachse A auf das Trägheitsmoment J_B bezogen auf eine zur betrachteten Schwerpunktsachse parallele Achse geschlossen werden, wenn beide einen Abstand b aufweisen:

$$J_B = J_A + mb^2 \quad (3.10)$$

mit m der Masse des Körpers, wie zuvor.

3.3 Aufbau

Der Versuch wird aufgebaut ausgehend von einer LEYBOLD DIDACTIC (LD) Drillachse, die auf einem gusseisernen Stativ vertikal montiert ist, so dass die Bewegung auf einer

Äquipotentialfläche der Schwerkraft stattfindet (keine zusätzliche äußere Kraft durch das Erdschwerefeld). Das Stativ kann durch drei verstellbare Füße ausgerichtet werden. Es wird eine sog. Libelle verwendet (eine kleine Wasserwaage, die in zwei Achsen sensitiv ist), um die Bewegungsebene (nicht das Stativ!) waagrecht auszurichten.

Auf der Drillachse kann über ein Bajonett alternativ befestigt werden:

- Ein Querstab mit regelmäßigen Kerbungen
- Eine Vollkugel aus Holz
- Eine Kreisscheibe mit verschiedenen Bohrungen

Die Schwingbewegung wird mit Hilfe einer Reflektionslichtschranke gemessen, die an einem zweiten Stativ befestigt wird, so dass sich ein konstanter und kurzer Abstand (ca. 5 – 10 mm) zu einer bewegten Oberfläche ergibt, die im Nulldurchgang der Schwingung mit einer schwarzen Markierung versehen ist. Das Signal der Lichtschranke wird über ein LD SENSOR CASSY II ausgelesen, und in der *Software* LD CASSY LAB II visualisiert.

Aufgabe 1

Sie finden den Aufbau weitgehend vorbereitet vor. Stellen Sie sicher, dass er wie erwartet funktioniert und ausgerichtet ist. Fertigen Sie eine Skizze an.

3.4 Auswertungsstrategien

Es stehen zwei Methoden der Trägheitsmomentbestimmung zur Verfügung. Beide sollen im Rahmen ihrer experimentellen Möglichkeiten verglichen werden.

3.4.1 Trägheitsmoment aus der Geometrie

Mit Hilfe der Gleichungen (3.7) bis (3.9) kann aus Kenntnis von Masse und Geometrie direkt ein Trägheitsmoment berechnet werden.

Aufgabe 2

Bestimmen Sie die Masse der Holzkugel und ihren Radius, geben Sie jeweils experimentelle Unsicherheiten an. Führen Sie eine Fehlerfortpflanzungsberechnung aus, und geben Sie damit das Trägheitsmoment gemeinsam mit einer Unsicherheit an.

3.4.2 Trägheitsmoment aus der Schwingungsmessung

Das Richtmoment der Drillachse wird durch direkte Messung mit einem Kraftmesser bestimmt.

Aufgabe 3

Montieren Sie den Querstab, markieren Sie die Nulllage. Lenken Sie ihn nun um 90° aus und geben Sie eine Unsicherheit dieser Einstellung an. Halten Sie ihn in dieser Position mit dem Kraftmesser, den Sie bei einer geeigneten Kerbung einhaken und senkrecht zum Querstab in der Bewegungsebene ausrichten. Notieren Sie die Kraft gemeinsam mit einer Unsicherheit. Messen Sie den Kraftarm zur Drehachse, und geben Sie ihn gemeinsam mit einer Unsicherheit an.

Aufgabe 4

Geben Sie eine Formel an, mit der aus diesen drei Größen die Winkelrichtgröße bestimmt werden kann. Führen Sie eine Fehlerfortpflanzungsberechnung aus, und geben Sie die Winkelrichtgröße gemeinsam mit einer Unsicherheit an.

Das CASSY kann die Nulldurchgänge der schwingenden Körper aufzeichnen. Das schrittweise experimentelle Vorgehen ist:

- Es wird für die “Timer-Box” die Einstellung “Pegel E ” ausgewählt.
- Es wird eine sinnvolle Messzeit und ein sinnvolles Messintervall eingestellt. Für diesen Versuch muss das Intervall sehr kurz gewählt werden (bspw. $10\ \mu\text{s}$), um die wenigen verwendeten Datenpunkte möglichst exakt zu kennen.
- Als Datenpunkte werden nur die Zeiten des Wechsels zwischen schwarz/weiß ausgegeben, jeweils gemeinsam mit dem Pegel 0/1.

Aufgabe 5

Montieren Sie nun wieder die Holzkugel. Bestimmen Sie die Breite des schwarzen Klebebandes, und daraus den Winkelbereich $\Delta\varphi$ der Verdeckung der Lichtschranke. Geben Sie jeweils Unsicherheiten an, führen Sie eine Fehlerfortpflanzungsberechnung aus, und geben Sie das Ergebnis gemeinsam mit einer Unsicherheit an.

Aufgabe 6

Richten Sie die Lichtschranke so aus, dass sie während des Experiments konstant ca. 5 mm Abstand vom Äquator der schwingenden Kugel hat. In Ruhelage ist die Lichtschranke auf das Zentrum des schwarzen Bandes gerichtet. Lenken Sie die Kugel um 90° aus, lassen Sie sie los und starten Sie die Messung im CASSY LAB 2.

Aufgabe 7

Kopieren Sie die Daten nach EXCEL. Berechnen Sie jeweils die Mittenzeiten der Verdeckungen durch das Klebeband. Berechnen Sie dann aus *jeder zweiten* dieser Zeiten die aktuelle Periodendauer. Tragen Sie die Periodendauer über der Anzahl der Perioden in einem Diagramm auf.

Aufgabe 8

Bestimmen Sie aus der Streuung der Periodendauern eine Varianz und verwenden Sie sie als Unsicherheit. Bestimmen Sie das Trägheitsmoment aus der Periodendauer. Führen Sie eine Fehlerfortpflanzungsberechnung aus, und geben Sie das Trägheitsmoment gemeinsam mit einer Unsicherheit an.

Aufgabe 9

Vergleichen Sie das Ergebnis aus Aufgabe 2 mit dem aus Aufgabe 8. Kommentieren Sie.

3.5 Durchführung

3.5.1 Dämpfung aus der Periodendauer

Die Periodendauer ist im ungedämpften Fall unabhängig von der Amplitude. Im gedämpften Fall (STOKESScher Dämpfungsterm) wird die Periodendauer durch:

$$\omega_\delta = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (3.11)$$

abhängig von der Dämpfung; gleichzeitig führt die Dämpfung zu einer Verringerung der Amplitude. Dadurch werden Amplitude und Dämpfung doch implizit verbunden. Allerdings ist der Einfluss auf die Periodendauer sehr schwach, so dass es einfacher ist, die Amplitude direkt zu messen. Auch das ist mit dem bisherigen Aufbau auf folgende Weise mind. qualitativ möglich. Es sind:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \sin(\omega_0 t - \psi_0) \quad \text{und:} \quad \dot{\varphi}(t) = \varphi_0 \omega_0 \cos(\omega_0 t - \psi_0) \quad (3.12)$$

so dass sich im Nulldurchlauf eine Winkelgeschwindigkeit von $\varphi_0 \omega_0$ ergibt. Diese Winkelgeschwindigkeit entspricht gerade $\Delta\varphi/\Delta t$, wobei Δt die Dunkelzeit ist (Differenz der Zeitpunkte letzter und erster Verdunklung). Daraus ergibt sich:

$$\varphi_0 = \frac{\Delta\varphi}{\omega_0 \Delta t} \quad (3.13)$$

Aufgabe 10

Werten Sie die bereits aufgenommenen Daten im Excel entsprechend dieser Gleichung aus. Das heißt, Sie bestimmen die Differenzen Δt , verwenden das zuvor berechnete ω_0 und das gemessene $\Delta\varphi$, um die Abhängigkeit $\varphi_0(t)$ zu erhalten. Stellen Sie sie graphisch dar. Vergleichen Sie mit dem beobachteten Verhalten und kommentieren Sie sachlich die quantitative Belastbarkeit dieser Messreihe.

3.5.2 Steinerscher Satz

Aufgabe 11

Montieren Sie nun die gelochte Kreisscheibe, indem Sie zunächst das zuvor verwendete Bajonett von der Drillachse abschrauben, und an gleicher Stelle die Kreisscheibe befestigen. Bestimmen Sie das Trägheitsmoment aus der Periodendauer einer Schwingung mit Anfangs 90° Auslenkung. Wiederholen Sie diese Messung für alle einstellbaren Kerben.

Aufgabe 12

Vermessen und wägen Sie die gelochte Kreisscheibe. Berechnen Sie das Trägheitsmoment um die Symmetrieachse. Führen Sie eine Fehlerfortpflanzungsberechnung aus, und geben Sie das Trägheitsmoment gemeinsam mit einer Unsicherheit an.

Aufgabe 13

Verwenden Sie den STEINERSchen Satz, um aus den via Periodendauer gemessenen Trägheitsmomenten die zugehörigen Abstände b der Bohrungen zum Zentrum zu bestimmen. Führen Sie eine Fehlerfortpflanzungsberechnung aus, und geben Sie die Radien gemeinsam mit einer Unsicherheit an. Vergleichen Sie mit den gemessenen Radien. Kommentieren Sie.

3.6 Ergebnis

Aufgabe 14

Beschreiben Sie die erhaltenen Ergebnisse und fassen Sie die wichtigsten Zahlenwerte gemeinsam mit ihren Unsicherheiten zusammen.

3.7 Fazit

Aufgabe 15

Formulieren Sie das Fazit Ihres Versuchs, ausgehend vom eingangs formulierten Ziel.

Kapitel 4

Versuch: Pohlsches Rad

4.1 Ziel

Aus Messungen der nominell freien Schwingung eines Drehpendels soll die Eigenkreisfrequenz bestimmt werden. Aus dem Abklingverhalten unter dem Einfluss einer Wirbelstrombremse sollen die jeweiligen Abklingkonstanten für gegebenen Spulenstrom bestimmt werden. Aus dem stationären Schwingverhalten bei äußerer Anregung der Schwingung durch einen Elektromotor sollen Resonanzkurven bestimmt werden.

4.2 Theorie

Das nach dem deutschen Physiker ROBERT WICHARD POHL benannte Drehpendel dient zur Untersuchung von freien, gedämpften und erzwungenen harmonischen Drehschwingungen. Eine massive Metallscheibe ist um eine horizontale Achse drehbar gelagert und mit einer Rückstellfeder gekoppelt, die die Ruhelage der Schwungscheibe vorgibt. Eine elektromagnetische Wirbelstrombremse dämpft diese Schwingungen in Abhängigkeit des gewählten Spulenstromes. Zusätzlich kann das Drehpendel über einen externen Motor zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden. Während die mechanischen Aspekte in den Vorlesungen zur “Physik 1” ausführlich behandelt wurden, und hier daher nur sehr kurz zusammengefasst werden, stellt die Funktionsweise einer Wirbelstrombremse neuen Stoff dar und wird entsprechend ausführlicher behandelt.

4.2.1 Harmonische Schwingungen

Schwingungen werden in freie und erzwungene, sowie in ungedämpfte und gedämpfte Schwingungen eingeteilt. Bei der freien Schwingung wird dem Oszillator einmalig Energie durch einen Stoß oder eine Auslenkung zugeführt, dann wird das System sich selbst überlassen. Dabei schwingt der Oszillator mit einer konstanten Frequenz, wobei der Scheitelwert der Schwingung bei einem ungedämpften System der Auslenkung entspricht (ungedämpfte freie Schwingung). Wird dem System Energie entzogen (bspw. indem externe mechanische Arbeit geleistet wird, oder durch dissipative Prozesse, Reibung), so nimmt der Scheitelwert der freien Schwingung im zeitlichen Verlauf ab (gedämpfte freie Schwingung). Die Frequenz der gedämpften freien Schwingung ist aufgrund des Energieverlustes kleiner als die Eigenfrequenz der ungedämpften freien Schwingung.

4.2.2 Freie Schwingungen

Die Schwingungsgleichung eines harmonischen Drehschwingers lautet:

$$0 = \ddot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi \quad \text{und wird gelöst durch:} \quad \varphi(t) = \varphi_0 \cos(\omega_0 t - \psi_0) \quad (4.1)$$

mit φ dem momentanen Auslenkungswinkel, ω_0 der Eigenkreisfrequenz, φ_0 der Schwingungsamplitude und ψ_0 einer Phasenverschiebung.

4.2.3 Gedämpfte Schwingungen

Für eine schwache geschwindigkeitsproportionale Dämpfung (bspw. STOKES-Reibung) wird das zu:

$$0 = \ddot{\varphi} + 2\delta\dot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi \quad \text{und wird gelöst durch:} \quad \varphi(t) = \varphi_0 \exp(-\delta t) \cos(\omega_\delta t - \psi_0) \quad (4.2)$$

mit δ der Abklingkonstanten und ω_δ der gedämpften Kreisfrequenz, für die gilt:

$$\omega_\delta = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (4.3)$$

4.2.4 Erzwungene Schwingungen

Für eine erzwungene Schwingung wird das zu:

$$\frac{T_0}{J} \cos(\omega t) = \ddot{\varphi} + 2\delta\dot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi \quad \text{und wird gelöst durch:} \quad \varphi(t) = \varphi_0 \cos(\omega t - \psi) \quad (4.4)$$

mit T_0 dem erregenden Drehmoment, J dem Trägheitsmoment des Schwingers, ω der Anregungskreisfrequenz, und ψ der Phasenverschiebung zwischen Anregung und Reaktion des Systems. Es ergibt sich eine Resonanzkurve (Frequenzgang der Amplitude) der Form:

$$\frac{\varphi_0(\omega)}{\varphi_0(0)} = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\delta\omega)^2}} \quad (4.5)$$

mit einer Resonanzfrequenz von:

$$\omega_R = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} \quad (4.6)$$

4.2.5 Wirbelstrombremse

Eine Wirbelstrombremse ist eine berührungslose und daher verschleißfreie Möglichkeit der Dämpfung einer linearen oder rotatorischen Bewegung. Als Ständer wird ein Elektromagnet verwendet, der typischer Weise aus einem Weicheisenjoch besteht, um das eine Spule mit N Windungen Kupferlackdraht gewickelt ist. Fließt durch diese Spule eine elektrische Stromstärke I , so ergibt sich eine elektrische Durchflutung von:

$$\Theta = NI \quad (4.7)$$

Aus dem Durchflutungsgesetz (bzw. AMPÈRESchen Gesetz) folgt dann für die magnetische Feldstärke $\mathbf{H}$ entlang eines geschlossenen Pfades (mit Linienelement $d\mathbf{r}$), der diese Durchflutung einschließt:

$$\Theta = \oint \mathbf{H} d\mathbf{r} \quad (4.8)$$

Die auf diese Weise erregten magnetischen Feldlinien folgen dem Weg geringsten magnetischen Widerstands (geringste Reluktanz R_m). Dieser Weg ist gerade durch das Weichenjoch gegeben, da dessen magnetische Leitfähigkeit (Permeabilität μ) um ein Vielfaches größer ist als die der umgebenden Luft (ähnlich wie eine elektrische Stromstärke auf einen gut leitenden Kupferdraht begrenzt ist, weil die umgebende Luft ein sehr viel schlechterer elektrischer Leiter ist). Die Form des Jochs gibt damit einen besonders vorteilhaften Integrationsweg im Linienintegral Gleichung (4.8) vor, und für einfache Jochgeometrien kann das Linienintegral oft durch eine Summe von Produkten für jeweils in sich homogene Jochabschnitte ersetzt werden. Das Joch ist nun so ausgeformt, dass die Feldlinien auf einen Luftspaltbereich gebündelt werden, in dem der Läufer bewegt wird. In diesem Luftspalt herrscht dann eine magnetische Flussdichte:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4.9)$$

mit $\mathbf{H}$ der magnetischen Feldstärke, die sich aus dem Durchflutungsgesetz ergibt, also aus dem Erregerstrom und den magnetischen Eigenschaften des Jochs. Über den gesamten Luftspalt ergibt sich damit ein magnetischer Fluss:

$$\Phi = \int \mathbf{B} \, d\mathbf{A} \quad (4.10)$$

Als Läufer wird ein elektrisch gut leitendes Material genommen, in der Regel ein Metall, besonders vorteilhaft Kupfer (wie im hier betrachteten Fall). Während nun der Läufer in das Joch eintaucht (oder aus ihm auftaucht), ändert sich die magnetische Flussdichte, und es ergibt sich nach dem Induktionsgesetz (bzw. FARADAYSchen Gesetz) eine induzierte Spannung:

$$U_i = -\dot{\Phi} \quad (4.11)$$

Diese Spannung liegt an *innerhalb* des Kupfers, und ist orientiert entlang des Umfangs des Bereichs, in dem sich der magnetische Fluss geändert hat. Aufgrund der Leitfähigkeit des Kupfers ergibt sich aus dieser Spannung ein Strom. Da der genannte Umfang in sich geschlossen ist, handelt es sich um einen Kreisstrom, oder Wirbelstrom I_e (von engl. *eddy current*). Obwohl dieser Strom also zu keinem *externen* Ladungstransport führt, gehen dennoch JOULEsche Verluste einher gemäß:

$$P = U_i I_e = R I_e^2 \quad (4.12)$$

Sie führen zu einer Erwärmung des Läufers, und entziehen damit insbesondere der Bewegung des Läufers kinetische Energie. Auf diese Weise wird der Läufer abgebremst.

Diese Abbremsung kann man zusätzlich (zu diesem Argument in Begriffen von Energien) noch auf eine andere Weise verstehen (in Begriffen von Kräften). Die Wirbelströme erzeugen selbst wieder ein magnetisches Feld, das ringförmig um den Strom orientiert ist. Insgesamt ergibt sich für den Kreisstrom (wie für eine Spule) ein magnetisches Feld, das entlang der Symmetrieachse der Spule orientiert ist. Gemäß der LENZschen Regel ist es jedoch genau in *entgegengesetzter* Richtung orientiert wie das Feld des äußeren Jochs, das den Wirbelstrom erzeugt hat. Man kann sich also die Abbremsung auch so verdeutlichen, dass sich diese beiden magnetischen Felder aufeinander abstützen, ebenso wie sich zwei Permanentmagnete aufeinander abstützen können bei geeigneter Orientierung der magnetischen Pole.

Mit Gleichung (4.12) kann für die dämpfende Wirkung der Wirbelstrombremse daher festgestellt werden, dass die dissipierte Leistung proportional ist zum Quadrat der Stärke des Wirbelstroms, I_e . Nun ist der Wirbelstrom nach Gleichung (4.11) proportional der Änderung des magnetischen Flusses; weiter ist der magnetische Fluss (und damit seine Änderung) nach Gleichung (4.10) proportional zur magnetischen Flussdichte; die ist nach Gleichung (4.9) proportional zur magnetischen Feldstärke (solange die Permeabilität μ konstant bleibt); die ist nach Gleichung (4.8) proportional zur elektrischen Durchflutung; und die ist schließlich nach Gleichung (4.7) proportional zur erregenden elektrischen Stromstärke. Das bedeutet zusammen, dass solange die magnetische Leitfähigkeit (Permeabilität) des Jochs konstant ist, ist die Wirbelstromstärke proportional zur erregenden Stromstärke. Im vorliegenden Versuch ist das weitgehend der Fall. Damit gilt mit Gleichung (4.12):

$$P \propto I^2 \quad (4.13)$$

mit I der elektrischen Stromstärke *in der Spule* der Wirbelstrombremse. Tatsächlich interessiert sind wir aber nicht an der Verlustleistung, sondern an der Abklingkonstanten, δ . Die hatten wir vorn eingeführt für ein STOKESSches Dämpfungsmodell, in dem das dämpfende Moment proportional zur Winkelgeschwindigkeit ist. Das ist für die Wirbelstrombremse tatsächlich gegeben. Nach Gleichung (4.11) ist die induzierte Spannung proportional zur Änderungsrate des magnetischen Flusses. Bereits zuvor hatten wir verwendet, dass daraus eine Proportionalität zum magnetischen Fluss selbst folgt. Zusätzlich folgt aber auch eine Proportionalität zur Bewegungsgeschwindigkeit des Läufers durch den Luftspalt (die Rate ist umso größer, je größer diese Geschwindigkeit ist), und damit zur Winkelgeschwindigkeit, wie gewünscht. Die Wirbelstrombremse hat daher nicht nur den Vorteil, verschleißfrei zu sein; sie realisiert auch auf ideale Weise das hier betrachtete Dämpfungsmodell.

Ausgehend von der Annahme, dass das System jedoch auch ohne die Wirbelstrombremse schon eine bestimmte, geringe Dämpfung δ_0 aufweist durch Reibung u.ä., dürfen wir daher für die Abklingkonstante folgende funktionale Form annehmen:

$$\delta(I) = \delta_0 + \lambda I^2 \quad (4.14)$$

mit λ einer Instrumenten-Konstanten mit Einheit $[1/(A^2s)]$. Es kann alternativ auch ein erweitertes Modell verwendet werden:

$$\delta(I) = \delta_0 + \kappa I + \lambda I^2 \quad (4.15)$$

mit κ einer Instrumenten-Konstanten mit Einheit $[1/(As)]$. Wie stets sind die Reibungsmodelle für die zusätzlichen Terme (nicht proportional I^2) nur heuristische Näherungen, so dass es legitim ist, dasjenige Modell zu verwenden, das zur besten Übereinstimmung mit den Beobachtungen führt.

4.3 Aufbau

Der Versuch wird aufgebaut ausgehend von einem LEYBOLD DIDACTIC (LD) POHLschen Rad, in dem eine Anregung durch einen regelbaren Elektromotor, vermittelt durch eine Kurbelmechanik und eine Drehfeder, bereits integriert ist, ebenso wie eine regelbare Wirbelstrombremse. Die Winkelmessung erfolgt über einen Drehwinkelgeber, der auf die Drehachse aufgesteckt ist, und dessen Gehäuse über eine Metallstange mechanisch gehalten wird. Eine starre Fixierung ist hier nicht vorteilhaft, weil es durch Fehlausrichtungen

im Aufbau zu einer leichten Schlingerbewegung des Sensor kommt, die ggf. negativ auf das eigentliche POHLsche Rad zurückwirken würde, wenn sie mechanisch unterdrückt würde.

Über ein LD SENSOR CASSY II und die Software LD CASSY LAB II wird der Winkelsensor ausgelesen, und die Spannung am Elektromotor, sowie der Strom an der Wirbelstrombremse gemessen. Visualisiert wird der Winkel über der Zeit.

Aufgabe 1

Sie finden den Aufbau weitgehend vorbereitet vor. Stellen Sie sicher, dass er wie erwartet funktioniert und ausgerichtet ist. Fertigen Sie eine Skizze an.

Das CASSY zeichnet mit konstanter, aber einstellbarer Zeitbasis den Drehwinkel φ auf. Das schrittweise experimentelle Vorgehen ist:

- Das SENSOR-CASSY 2 wird aktiviert.
- Die Steuerungssoftware CASSY LAB 2 wird gestartet.
- Mit F5 werden angeschlossene CASSY-Module angezeigt.
- Es wird für den “Drehbewegungssensor S” die Einstellung “Winkel α (°)” ausgewählt.
- Es wird ein Messbereich von 180° ausgewählt und Nullpunkt mittig ausgewählt.
- Vor jeder Messung wird eine *Offset*korrektur durchgeführt (es wird “ $\rightarrow 0 \leftarrow$ ” gedrückt).
- Es wird eine sinnvolle Messzeit und ein sinnvolles Messintervall eingestellt. Für die Bestimmung der Periodendauer sollten 10 bis 20 volle Perioden in möglichst hoher Auflösung abgebildet werden. Für das Abklingverhalten sollte das vollständige Abklingen dargestellt werden, mit entsprechend angepasster Auflösung.

4.4 Freie Schwingung

Zuerst betrachten wir das System ohne Erregung durch den Elektromotor und ohne zusätzliche Dämpfung durch die Wirbelstrombremse. Es bleibt jedoch die mechanische Reibung im System, die eine dämpfende Wirkung ausübt.

Aufgabe 2

Lenken Sie das Rad um ca. 90° aus, und messen Sie den Winkelverlauf bis das System sich i.W. wieder in Ruhe befindet (zwei bis drei Minuten Messzeit genügen i.d.R.). Kopieren Sie die Daten in EXCEL.

Aufgabe 3

Schreiben Sie eine Routine, die die Maxima identifiziert und eine Auftragung der Amplitude über der Zeit ermöglicht für die Maximalpunkte. Machen Sie eine solche Auftragung. Optimieren Sie die Messparameter für Ihre Routine.

Ein mögliches Vorgehen hierzu ist:

- Vergleichen Sie den Funktionswert n mit dem $n - 1$. Ist $\varphi_n > \varphi_{n-1}$ schreiben Sie in eine Spalte 0, sonst 1.

- Wiederholen Sie den Vergleich in die andere Richtung. Ist als $\varphi_n > \varphi_{n+1}$ schreiben Sie in die nächste Spalte 0, sonst 1.
- Sind beide Bedingungen erfüllt (also bspw. die Summe der beiden vorherigen Spalten gleich null), dann schreiben Sie Zeit und Winkel in die nächsten beiden Spalten, sonst schreiben Sie Nullen.
- Sortieren Sie diese beiden Spalten absteigend nach den Winkeln, betrachten Sie im Weiteren nur noch die oberen Werte (ungleich null).

Beachten Sie für dieses Vorgehen, dass ein sehr feines Zeitinkrement im Vergleich zum Winkelinkrement dazu führt, dass viele gleiche Winkelwerte auftreten, so dass es keinen Punkt mehr gibt, der im oben programmierten Sinne ein Maximum darstellt. Ersetzt man die $>$ und $<$ Relationen durch $\geq$ und $\leq$, gibt es statt dessen *vielen* scheinbare Maxima, die aber eigentlich nur Horizontale sind. Schlimmer noch: auch Horizontale im Minimum oder anderswo werden so falsch identifiziert. Es gibt eine optimale Wahl des Zeitinkrements und Winkelinkrements, dass dieser Algorithmus möglichst zuverlässig funktioniert, und nur minimale manuelle Korrektur der Daten erfordert.

Aufgabe 4

Bestimmen Sie die Periodendauer aus der Differenz des ersten und eines weit entfernten Maximums, das noch sicher und genau identifiziert werden kann. Berechnen Sie daraus die Kreisfrequenz ω_0 .

Aufgabe 5

Betrachten Sie die Art des Abklingverhaltens. Entspricht es exponentiellem Verhalten (einer geschwindigkeitsproportionalen Reibkraft) oder linearem Verhalten (einer konstanten Reibkraft)? Ändert sich das Verhalten ggf. mit abnehmender Amplitude? Prüfen Sie, indem Sie den Quotienten aufeinanderfolgender Amplituden über der lfd. Nummer des Maximums auftragen.

Wir betrachten nun dasselbe System weiterhin ohne Erregung durch den Elektromotor, jedoch mit zusätzlicher Dämpfung durch die Wirbelstrombremse.

Aufgabe 6

Stellen Sie die Spulenströme $I = 0.5 \text{ A}$, 1.0 A , und 1.5 A ein. **Beachten Sie, dass der Elektromagnet nur kurzzeitig mit maximal 2 A belastet werden darf!** Wiederholen Sie die bisher beschriebenen Messungen und die Auswertungen; Sie erhalten so ω_δ .

Aufgabe 7

Für Bereiche der Daten, in denen ein exponentieller Abfall der Amplitude beobachtet wird, bestimmen Sie die Abklingkonstante δ durch eine exponentielle Regression. Stellen Sie die Einhüllende gemeinsam mit den Rohdaten dar.

Aufgabe 8

Berechnen Sie aus ω_0 (aus Aufgabe 4) und δ (aus Aufgabe 7) die Kreisfrequenz ω_δ , unter der Annahme geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung. Vergleichen Sie mit der Kreisfrequenz ω_δ , die Sie in Aufgabe 6 bestimmt hatten. Kommentieren Sie.

4.5 Erzwungene Schwingung

Wir betrachten nun eine erzwungene Schwingung und nehmen eine Resonanzkurve auf (stationäre Amplitude über Kreisfrequenz). Die Kreisfrequenz wird ausgewählt über die Motorspannung. Diese Motorfrequenz wird selbst nicht gemessen. Im stationären Zustand stimmt sie jedoch mit der Kreisfrequenz des POHLschen Rades überein und wird dadurch zugänglich.

Der sog. Einschwingzustand ist dadurch charakterisiert, dass zwei unterschiedliche Frequenzen im System nebeneinander existieren: die Eigenfrequenz des POHLschen Rades, und die Erregerfrequenz. Wie stets wenn in einem System zwei Frequenzen überlagert werden, kommt es zu Schwebungsphänomenen, die an zeitlich veränderlichen Amplituden erkennbar sind. Der stationäre Zustand ist im Gegensatz dazu daran erkennbar, dass die Schwingungsamplitude φ_0 des POHLschen Rades *konstant* ist. Ihre Messungen starten Sie daher für diesen Teil des Experiments erst dann, wenn der stationäre Zustand erreicht wurde. **Beachten Sie, dass das einige Minuten dauern kann, und Sie keine Möglichkeit haben, diesen Vorgang zu beschleunigen. Arbeiten Sie daher im gesamten Versuch zielgerichtet und konzentriert, um keine Zeit zu verlieren, die Ihnen hier später fehlen könnte!**

Um eine gute Darstellung der Resonanzkurve zu erhalten, benötigen Sie die meisten Datenpunkte dort, wo die Krümmung der Kurve hoch ist, sowie mindestens je einen Punkt zum Rand eines sinnvollen Darstellungsbereichs hin.

Aufgabe 9

Überlegen Sie, was ein sinnvoller Darstellungsbereich ist, und welchen Kurvenverlauf Sie erwarten um festzulegen, wo in diesem Diagramm Sie Ihre Messpunkte legen sollten. Begründen Sie Ihre Wahl.

Aufgabe 10

Bestimmen Sie für $I = 0.5$ A und $I = 1.0$ A eine Resonanzkurve, indem Sie je ca. 10 – 15 Punkte aufnehmen. Für jeden Punkt stellen Sie eine Motorspannung ein, warten den stationären Zustand ab, und nehmen den Amplitudenverlauf auf. Modifizieren Sie das Programm aus Aufgabe 3, um sowohl Minima als auch Maxima aufzuzeichnen. Bestimmen Sie daraus die Amplitude. Bestimmen Sie die Periodendauer wie in Aufgabe 4.

Aufgabe 11

Verwenden Sie die Werte von δ für die gewählten Ströme aus Aufgabe 7, sowie die Kreisfrequenz ω_0 aus Aufgabe 4, um theoretisch erwartete Resonanzkurven zu berechnen. Stellen Sie sie gemeinsam mit den Ergebnissen aus Aufgabe 10 dar.

4.6 Ergebnis

Aufgabe 12

Beschreiben Sie die erhaltenen Ergebnisse und fassen Sie die wichtigsten Zahlenwerte gemeinsam mit ihren Unsicherheiten zusammen.

4.7 Fazit

Aufgabe 13

Formulieren Sie das Fazit Ihres Versuchs, ausgehend vom eingangs formulierten Ziel.