

Dieses Dokument wurde im Rahmen des Erasmus+ -Projekts "Developing Digital Physics Laboratory Work for Distance Learning" (Di-giPhysLab) erstellt. Mehr Infos: www.jyu.fi/digiphyslab

Das Reibungsverhalten von Türen

Lehrendenversion

16.1.2023



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Dieses Werk ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Reibungseffekte bei einer zuschlagenden Tür – Anleitung für Lehrende

Aufgabenübersicht

- Thema: Modellierung der Reibungseffekte bei einer zuschlagenden Tür
- Zielgruppe: Physik- und Physiklehramtsstudierende in der Studieneingangsphase
- Zeitrahmen: mindestens 2h, eher 3-4h
- Empfohlene Sozialform: Partnerarbeit (2 Studierende pro Team)

Zur Vorbereitung

Ziel des Experiments ist das Testen verschiedener Reibungsmodelle an den mittels eines Smartphones ermittelten Bewegungsdaten einer zuschlagenden Tür. Aufgrund dieser Fokussierung der Aufgabe auf die Datenanalyse ist eine intensive Vorbereitung auf das Experiment seitens der Lernenden zwingend erforderlich. Ausgangspunkt der inhaltlichen Vorbereitung kann dabei das zum Experiment publizierte Paper sein. Darüber hinaus bedarf es einiger technischer Vorbereitungen, sofern die erforderliche Software (i. W. *phyphox* und *SciDaVis* bzw. *Origin*) nicht bereits installiert wurde. Falls *phyphox* und *SciDaVis* bzw. *Origin* den Lernenden noch nicht bekannt sein sollte, sind auch weitergehende Vorbereitungsaufgaben zur Einarbeitung sinnvoll (für Anregungen siehe Anleitung für Studierende).

Zum Aufbau und zur Durchführung

Für das Experiment können die Beschleunigungssensoren (mit oder ohne Erdbeschleunigung g) sowie das Gyroskop verwendet werden. Das Gyroskop besitzt i. A. ein geringeres Rauschen als die Beschleunigungssensoren. Außerdem liefert es direkt die Winkelgeschwindigkeiten, sodass keine Umrechnung von Radialbeschleunigungen in Winkelgeschwindigkeiten erfolgen muss, wie es bei Verwendung der Beschleunigungssensoren notwendig ist. Das Mitmessen der Erdbeschleunigung hat den Vorteil, dass anhand der Echtzeitmessdaten eine präzise Ausrichtung des Smartphones möglich ist.

Das Smartphone sollte mit einer der Koordinatenachsen möglichst orthogonal (für die Beschleunigungssensoren) bzw. parallel zur Drehachse (für das Gyroskop) ausgerichtet werden. So werden die Messwerte maximal, was zu einer höheren Präzision führt. Mitunter lohnt sich ein Vergleich der einzelnen Koordinatenachsen, da die Sensoren in die verschiedenen Richtungen unterschiedlich präzise messen. Die Benennung und Ausrichtung der Koordinatenachsen sind dabei geräteabhängig.

Abgesehen von der Messung mit dem Smartphone bedarf es nur bei Benutzung der Beschleunigungssensoren noch einer Messung des Abstandes zwischen Drehachse und Smartphone-Sensor, um auf die Winkelgeschwindigkeit schließen zu können. Die Parameter der Tür sind hingegen nicht erforderlich, da die Fitgleichungen in Hilfsmaterial (II) bereits auf das Trägheitsmoment der Tür normiert sind.

Das Smartphone sollte an der Türaußenseite (entgegen der Schwingrichtung) angebracht werden, damit sich dieses nicht aufgrund der Trägheit löst. Zur Befestigung eignet sich doppelseitiges Klebeband (hält verlässlich, ggf. Kleberückstände) oder das Anbringen eines Plastikbeutels mit gängigem Klebeband, in welchen dann das Smartphone gelegt werden kann. Bei der Verwendung des Gyroskops steigt die Präzision der Messung, je weiter das Smartphone von der Drehachse entfernt positioniert wird.

Zur Übertragung der Daten auf den PC

Zur Datenübertragung stehen im Wesentlichen drei Methoden zur Verfügung:

1. Es wird die remote-Funktion von *phyphox* benutzt. Hier werden die Smartphone-Daten (bei entsprechender Netzwerk-Verfügbarkeit) in Echtzeit auf den Computer übertragen. Auch ein ferngesteuertes Starten und Stoppen der Aufnahme ist so möglich.
2. Die Daten werden direkt per E-Mail, Bluetooth, Airdrop, etc. auf den Computer übertragen.

3. *Nur für Android-Geräte sinnvoll:* Die Daten werden zunächst auf dem Smartphone gespeichert. Da phyphox nicht direkt auf den internen Speicher zugreifen kann, muss hierzu eine Dateiverwaltungssapp wie z. B. TotalCommander benutzt werden, die die Datei entgegennehmen und intern abspeichern kann. Die Datei kann anschließend z. B. per Datenkabel übertragen werden.

Zur Auswertung

Vor dem Fitten sind die Daten entsprechend aufzubereiten. Auf folgende Aspekte wird hingewiesen:

- Aus dem Datensatz sind die relevanten Daten zu extrahieren. Hierzu ist die relevante Koordinatenachse zu bestimmen und nur der Ausschnitt zu verwenden, der die Schließbewegung der Tür vom Anstoßen (s. Maximum der Winkelgeschwindigkeit) bis kurz vorm Zufallen der Tür (s. schnellere Abnahme der Winkelgeschwindigkeit, Rauschen) beschreibt. Näheres hierzu findet sich im Paper.
- Bei Verwendung der Beschleunigungssensoren muss die Winkelgeschwindigkeit aus der Radialbeschleunigung a und dem Drehachsenabstand r über $\omega(t) = \sqrt{a/r}$ berechnet werden. Diese Formel ist nur für positive Beschleunigungswerte nutzbar. Gerade bei kleinen Winkelgeschwindigkeiten kann das Rauschen des Beschleunigungssensors aber so groß werden, dass selbst bei korrekter Positionierung des Smartphones negative Messwerte auftreten. Diese sollten dann entweder aus dem Datensatz entfernt, gleich 0 gesetzt oder mit einem anderen Vorzeichen versehen werden.
- Das Experiment erlaubt die Durchführung einer Fehleranalyse und -berechnung. Neben der Vermessung des Abstandes zwischen Beschleunigungssensor und Drehachse ist ein besonderes Augenmerk auf die Messgenauigkeit der Smartphone-Sensoren zu legen. Es empfiehlt sich, die Messung einige Sekunden vor der Bewegung der Tür zu starten, um im Ruhezustand das Grundrauschen zu messen. Der Mittelwert dieser Messwerte kann als systematische, die Standardabweichung als statistische Messunsicherheit identifiziert werden.

Bei der Verwendung der Fitformeln aus Hilfsmaterial II sind folgende Bedingungen zu beachten:

- Die Fitparameter a , b und c entsprechend nicht direkt den Parametern in $\tau_f = a + b\omega + c\omega^2$, sondern sind bereits auf das Trägheitsmoment der Tür normiert, d.h. durch dieses dividiert worden. Dadurch sind die Formeln für jede beliebige Tür nutzbar.
- Der Fitparameter w beschreibt die Anfangswinkelgeschwindigkeit. Dieses muss ebenfalls als Fitparameter verwendet werden, weil dem Algorithmus sonst notwendige Freiheitsgrade fehlen.
- Die Fitgleichungen beschreiben einen „Abfall“ der Winkelgeschwindigkeit aufgrund der Reibung. Daher muss das Vorzeichen aller Messwerte umgepolt werden, falls die Ausrichtung des Smartphones zu negativen Messwerten (und damit einem „Anstieg“ der Winkelgeschwindigkeit) führt.
- Die Fitgleichungen gelten nur, wenn das Zufallen der Tür zum Zeitpunkt $x = 0$ beginnt. Da die Messung i. d. R. schon vorher gestartet wird, müssen die Zeitwerte entsprechend korrigiert, die Messdaten also um den entsprechenden Betrag entlang der x -Achse nach links verschoben werden.
- Die Fits hängen immanent von den initial guesses ab, die dem Fitalgorithmus Startwerte (bzw. in *Origin* zusätzlich Suchintervalle) vorgeben. Unangemessene initial guesses können zu nicht erfolgreichen Fits führen. Zu erwarten sind gemäß den Formeln und Parametern im Paper (modifiziert um eine andere Türhöhe und -masse) positive Werte kleiner/gleich: $w \approx 0,2 \text{ s}^{-2}$ bis $w \approx 3 \text{ s}^{-2}$ (je nach der Wucht des Anstoßens der Tür), $a \approx 0,29 \text{ Nm}$, $b \approx 1,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$ und $c \approx 0,15 \frac{\text{Nm}}{\text{s}^2}$.

Zu erwartende Ergebnisse

Wie bereits im Paper diskutiert, sollten hinsichtlich der beiden Kriterien *möglichst großes R^2* und *Fitparameter in einer realistischen Größenordnung* die Modelle mit Newtonscher Reibung die Bewegung der zuschlagenden Tür präziser beschreiben als Modelle nur mit Stokes Reibung oder trockener Reibung. Bei den Modellen mit Newtonscher Reibung sollte eine Hinzunahme von Reibungstermen die

Präzision erhöhen, d.h. dass DN z. B. präziser ist als N und ggf. DSN auch präziser ist als DN. Diese Einschätzung hängt aber sehr von den Fits (und damit den initial guesses und den Algorithmen) ab.

Vorschläge zur Leistungsüberprüfung

Zur erfolgreichen Durchführung des Experiments bedarf es seitens der Studierenden einer intensiven inhaltlichen Vorbereitung. Zur Sicherstellung dieser Vorbereitung und zur gleichzeitigen Leistungsüberprüfung ist daher ein Antestat (z. B. in Form eines Tests, Quizz, ...) denkbar. Alternativ können auch die im Rahmen der Aufgabenbearbeitung erstellten Zusammenfassungen zur Datenauswertung (ähnlich der Führung eines Laborbuches) bewertet werden. Ferner ist neben dem Verfassen eines Laborberichts aufgrund der gut diskutierbaren Auswertung auch eine Posterpräsentation sinnvoll.

Vorschläge zur Modifikation des Experiments

Das in der Anleitung für Studierende geschilderte Slamming Door Experiment erlaubt eine Vielfalt Modifikationen und Anpassungen an individuelle Ziele und Rahmenbedingungen. Es folgt daher eine unvollständige Liste denkbarer Variationen der Experimentieraufgabe:

- Mitunter ist aus Zeitgründen das Testen aller sieben Reibungsmodelle nicht möglich. In dem Fall sollten aber nicht nur die drei einfachen Modelle (D, S, N) untersucht werden, da hier nicht die Bedeutung der initial guesses für den Erfolg eines Fits erkannt werden kann. Stattdessen empfiehlt sich die Konzentration auf die Modelle mit Newtonscher Reibung (N, DN, SN, DSN), da hier auch komplizierte Fitformeln genutzt werden und aus sachlogischer Sicht ohnehin das Auftreten Newtonscher Reibung zu erwarten ist. In dem Fall geht es dann darum, das einfachste der vier Modelle zu identifizieren, das die Daten noch präzise genug beschreibt.
- Da der Fokus ohnehin auf der Datenerhebung liegt, kann aus Zeitgründen oder aus organisatorischen Gründen (z. B. Verfügbarkeit freischwingender Türen, Studierendenzahl) auch ein vorgegebener Datensatz (second-hand data) ausgegeben oder die Datenaufnahme ins häusliche Umfeld der Studierenden verlagert werden. Sofern das Experiment in Präsenz durchgeführt ist, sollte die Priorisierung auf der Datenauswertung in Präsenz liegen, da diese das Zentrale der Aufgabenstellung ist und in Präsenz besser Diskussionen angeregt werden kann.
- Neben der Frage, welches Reibungsmodell die zuschlagende Tür für einen Datensatz (einmalige Bewegung der Tür) am präzisesten beschreibt, sind auch folgende Fragestellungen denkbar:
 - Welchen Einfluss hat der Abstand des Smartphones zur Drehachse auf die Aussagekraft der Reibungsmodelle?
 - Welchen Einfluss hat Anfangswinkelgeschwindigkeit der Tür auf die Aussagekraft der Reibungsmodelle?
 - Welchen Einfluss hat die Wahl der Sensoren (Gyroskop, Beschleunigung mit/ohne g) und die Wahl der Achsen (x, y, z) auf die Aussagekraft der Reibungsmodelle?
 - Welchen Einfluss hat das untersuchte Objekt (z. B. verschiedene Türen, oder auch Fenster, etc.) auf die Aussagekraft der Reibungsmodelle?

Sonstige Anmerkungen

- Tatsächlich stellen die sieben im Paper und in diesem Experiment diskutierten Reibungsmodelle bereits eine Vereinfachung der Realsituation dar, da von einem mittleren Drehmomentvektor ausgegangen wird, der fiktiv auf den Schwerpunkt der Tür angreift. Genau genommen ändert sich das Drehmoment aber inkrementell abhängig vom Abstand zur Drehachse, da die Winkelgeschwindigkeit der Tür an der Drehachse Null ist und an der Türfalze maximal wird. Um den unterschiedlichen Winkelgeschwindigkeiten der einzelnen Türbereiche und den resultierenden unterschiedlichen inkrementellen Drehmomenten ein Stück weit Rechnung zu tragen, wird in das Reibungsmodell sowohl die Stokes-Reibung (dominiert für kleine Winkelgeschwindigkeiten, geeignet für die Bereiche

der Tür nahe der Drehachse) als auch die Newtonsche Reibung (dominiert für große Winkelgeschwindigkeiten, geeignet für die Bereiche der Tür weiter entfernt der Drehachse) aufgenommen.

- In die Formeln 7 und 8 auf Seite 32 des Papers hat sich ein Fehler eingeschlichen. Korrekt wäre:

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= \sqrt{\left(\frac{\partial\omega}{\partial a_x}\Delta a_x\right)^2 + \left(\frac{\partial\omega}{\partial r}\Delta r\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2\sqrt{ra_x}}\Delta a_x\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{a_x(t)}}{2\sqrt[3]{r}}\Delta r\right)^2} = \sqrt{\frac{r^2\Delta a_x^2 + a_x^2\Delta r^2}{4r^3a_x}} \\ &= \frac{\sqrt{r^2\Delta a_x^2 + a_x^2\Delta r^2}}{2r\sqrt{r}\sqrt{a_x}} = \frac{\sqrt{r^2\Delta a_x^2 + a_x^2\Delta r^2}}{2r\sqrt{r}\omega\sqrt{r}} = \frac{\sqrt{r^2\Delta a_x^2 + a_x^2\Delta r^2}}{2r^2\omega} \end{aligned}$$

- Die Lernziele des Experiments für Lehramtsstudierende sind auch in den TPACK-Modellen verortbar, z. B.:

T= technological, P = pedagogical,
C = content, K = Knowledge

