

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

Frei rotierendes smartphone

Studierendenversion

28.2.2023



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/).

Freie Rotation von Smartphones

Motivation

Neben Translationsbewegungen treten häufig auch Rotationsbewegungen auf. Viele Rotationsbewegungen besitzen eine vordefinierte, fixe Rotationsachse, z. B. bei der Trommel einer Waschmaschine im Schleudergang oder Turbinen. Es gibt aber auch viele Bewegungen, gerade im Sport, in denen eine solche eindeutige Rotationsachse fehlt: Beim Sprung vom Zehnmeterurm kann man selbst erleben, dass nicht alle Drehungen ohne weiteres möglich sind und man sich teilweise stark verbiegen muss, um einen bestimmten Sprung zu schaffen. Auch bei diversen Skateboard-Tricks zeigt sich, dass bestimmte Rotationsbewegungen bei korrekter Ausführung sehr stabil sind (z. B. der Monster-Flip, bei dem eine perfekte Rotation um die mittlere Achse des Skateboards gelingen kann, <https://www.youtube.com/watch?v=tT5dIPf4tVs>), andere hingegen an sich instabil sind (z. B. beim Impossible Flip, bei dem die Rotation mit dem Fußrücken die Rotation stabilisiert werden muss, um eine Rotation um die Längsachse des Skateboards zu verhindern, <https://www.youtube.com/watch?v=wCucgxqIRiA>).

Welchen Gesetzen freie Rotationsbewegungen folgen, lässt sich gut mit einem Smartphone im freien Fall untersuchen. Das Smartphone kann mit der Hand in verschiedene Richtungen in Rotation versetzt und dann losgelassen werden. Im freien Fall führt es dann eine bestimmte Rotationsbewegung aus. Mithilfe der im Smartphone eingebauten Sensoren kann dieser Bewegungsvorgang analysiert werden. Ziel dieser Aufgabe ist es, dass Sie die Rotationseigenschaften und die Stabilität der einzelnen Hauptrotationsachsen Ihres Smartphones im freien Fall untersuchen und die physikalischen Eigenschaften beschreiben. So sollen dabei auch Hypothesen aufstellen und testen, wie sich das Anbringen zusätzlicher Gegenstände ans Smartphone (d. h. eine Modifikation der Form und Masseverteilung Ihres Drehkörpers) auf die Drehung auswirkt.

Experimentiermaterialien

Smartphone mit *phyphox*, Waage, starre Gegenstände zum Ankleben an das Smartphone (Ihre Kreativität ist gefragt!), Computer zur Datenanalyse, Gliedermaßstab, eine weiche Unterlage (z. B. Decke für das Smartphone - es wird geworfen!)

Adressierte experimentelle Fähigkeiten und inhaltliche Themen

Experimentelle Fähigkeiten: Hypothesen aufstellen & testen, Versuchsplanung, Erhebung von Messdaten, Analysieren von Daten

Themen Experimentalphysik: Freie Rotation, Trägheitsmoment, Luftwiderstand

mathematische Methoden: mehrdimensionale Integrale, Differenzialgleichungen

+ für **Physikstudierende:** vertiefte Analyse eines Problems

+ für **Lehramt:** verschiedene Darstellungsformen von Bewegung

Sie erhalten nun die Materialien für das Experiment *Freie Rotation von Smartphones*, bei dem Sie die Rotation Ihres Smartphones im freien Fall untersuchen. Nachfolgend finden Sie zunächst Materialien zur Vorbereitung auf das Experiment, dann das eigentliche Aufgabendokument zum Experiment sowie die Hilfsmaterialien (I) bis (III).

Die Vorbereitung

Bereiten Sie sich über die folgenden Hilfen inhaltlich vor, bevor Sie Ihr Experiment planen und durchführen. Bearbeiten Sie dazu auch die zugehörigen Teilaufgaben.

Technische Vorbereitungen

1. Bitte installieren Sie auf dem Smartphone die kostenlose App *phyphox*. Prüfen Sie bitte, ob Daten aus *phyphox* lokal auf Ihrem Smartphone gespeichert werden können. Bei Android-Geräten ist hierzu in der Regel eine kostenfreie Dateiverwaltungsapp wie z.B. *Total Commander* zu installieren.
2. Bitte organisieren Sie sich ein Programm zur Datenanalyse. Sie können entweder Python über browserbasierte jupyter-Notebooks (beispielsweise bei google colab oder direkt unter jupyter.org) oder SciDAVis bzw. Origin benutzen.

Inhaltliche Vorbereitung I

3. **Lesen Sie den nachfolgenden Informationstext zur Bestimmung von Trägheitsmomenten eines Smartphones und zu freien Rotationsbewegungen ohne fixe Rotationsachse durch und bearbeiten Sie die dazugehörigen Aufgaben.** Der Fokus sollte auf einem konzeptionellen Verständnis der relevanten Größen (Trägheitsmoment, Rotationsenergie, etc.) und dem Nachvollziehen der Formeln/Herleitungen liegen. Für weitere Informationen lesen Sie das dieser Aufgabe zugrundeliegende Paper von Wheatland et al. (2021): <https://aapt.scitacion.org/doi/full/10.1119/10.0003380>

Freie Rotation eines Smartphones

Das Smartphone

In einem Smartphone ist zur Bestimmung von dessen räumlicher Ausrichtung ein Gyroskop-Sensor verbaut. Gyroskope bestehen oft aus drei kardanis aufgehängten Kreiseln (s. Abbildung 1), die sich je nach äußerer Einwirkung drehen können. Aufgrund des Trägheitsmoments des Kreisels ändert sich dessen Ausrichtung der Drehachsen nicht, wenn man das Smartphone rotiert. Damit lässt sich für die drei Hauptachsen des Smartphones die Winkelgeschwindigkeit bei einer Drehung angeben.



Abbildung 1: Aufbau eines Gyroskops.

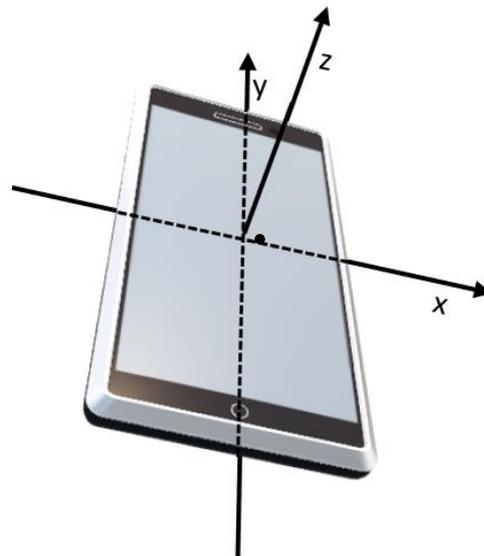


Abbildung 2: Smartphone mit Achsen durch den Schwerpunkt. Die Achsenorientierung ist für jedes Modell verschieden. Die Herleitung der Formeln im Text basiert auf der hier dargestellten Orientierung.

Das Trägheitsmoment

Die Rotationsbewegung eines starren Körpers wird maßgeblich durch das Trägheitsmoment bestimmt, welches sich aus der Anordnung seiner Masse m um die Rotationsachse ergibt. Für ein Smartphone kann man annehmen, dass es sich um einen Quader mit den Kantenlängen a , b und c handelt. Unter der Annahme, dass die Masse homogen im Quader verteilt ist, kann das Trägheitsmoment über $I_\phi = \rho \int_V r^2 dV$ bestimmt werden, wobei $\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot c}$ in diesem Fall die Dichteverteilung ist und r den Abstand von einer Rotationsachse ϕ angibt. Damit können nun der Drehimpuls L und die Rotationsenergie E_{rot} um den Schwerpunkt beschreiben werden:

$$L = I_x \omega_x \vec{e}_x + I_y \omega_y \vec{e}_y + I_z \omega_z \vec{e}_z \quad \text{bzw.} \quad E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} I_x \omega_x^2 + \frac{1}{2} I_y \omega_y^2 + \frac{1}{2} I_z \omega_z^2.$$

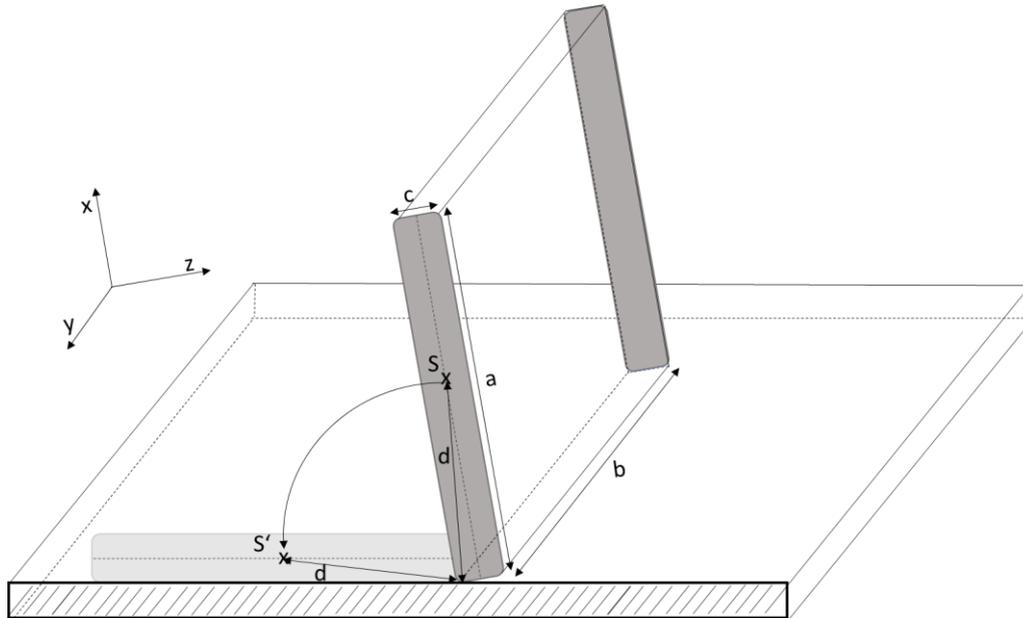


Abbildung 3: Skizze für den Kippvorgang des Smartphones mit den Kantenlängen a , b und c um dessen Schwerpunkt S auf eine weiche Unterlage. Die Länge d gibt an, wie weit der Schwerpunkt zu Beginn von der Rotationsachse entfernt ist. Das Koordinatensystem entspricht dem in Abbildung 2; der Ursprung liegt daher anders als der Übersichtlichkeit halber dargestellt im Schwerpunkt S des Smartphones.

Alternativ kann das Trägheitsmoment auch experimentell über eine kontrollierte Kippbewegung bestimmt werden (vgl. Kaps & Stallmach, 2020, <https://aapt.scitation.org/doi/full/10.1119/1.5145423>). Im Folgenden wird beispielhaft gezeigt, wie das Trägheitsmoment um die durch den Schwerpunkt verlaufende y -Hauptachse des Smartphones bestimmt werden kann. Dazu wird das Smartphone auf einer weichen Unterlage in Gleichgewichtslage senkrecht zur Unterlage auf die längste Kante b gestellt. Das Smartphone wird dann ganz vorsichtig so weit bezüglich der gewünschten Rotationsachse (s. Kante unten links in der Abbildung 3) gedreht, bis der Schwerpunkt des Smartphones S senkrecht über der Rotationsachse steht. In dieser Position erreicht der Schwerpunkt die größte Entfernung zur Unterlage, die der Länge einer halben Diagonalen von der einen Ecke des Smartphones bis zum Schwerpunkt S , also $d = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + c^2}$ entspricht. Kippt nun das Smartphone auf die breite Seite, wird nahezu die gesamte potentielle Energie in Rotationsenergie umgewandelt. Lediglich jene potentielle Energie verbleibt, die sich dadurch ergibt, dass sich der Schwerpunkt nach Auftreffen auf der Unterlage noch immer $\frac{c}{2}$ über dieser befindet. Entsprechend wird während des Kippvorgangs die potentielle Energie $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot \left(d - \frac{c}{2}\right)$ in Rotationsenergie umgewandelt. Für diese folgt $E_{\text{rot}} = \frac{I_b}{2} \cdot \omega_{\text{max}}^2$, weil zum Zeitpunkt des Auftreffens auf die Unterlage die Winkelgeschwindigkeit ω und damit die Rotationsenergie maximal werden. Dabei ist I_b das Trägheitsmoment des Smartphones bezüglich der Rotationsachse entlang der Kante b . Aufgrund der Energieerhaltung gilt dann:

$$\frac{I_b}{2} \cdot \omega_{\max}^2 = m \cdot g \cdot \left(d - \frac{c}{2}\right)$$

Da die Rotationsachse parallel zur durch den Schwerpunkt S verlaufenden y -Achse des Smartphones ist, kann letztlich der Steiner'sche Satz angewandt werden, um das Trägheitsmoment I_y zu bestimmen, sodass $I_y = I_b - m \cdot d^2$ folgt.

Vorbereitende Aufgaben zu den Trägheitsmomenten des Smartphones:

3a) Finden Sie (z. B. durch geeignete Testmessungen mit *phyphox*) heraus, wie die Achsen Ihres Smartphones benannt und ausgerichtet sind.

3b) Berechnen Sie die Trägheitsmomente I_x, I_y und I_z für Ihr Smartphone, indem Sie die Integrale für Rotationen bezüglich der jeweiligen Achsen explizit berechnen. Recherchieren oder messen Sie dafür auch die Kantenlängen und die Masse m Ihres Smartphones.

3c) Stellen Sie analog zur Beispielrechnung für I_y eine Formel für die Trägheitsmomente I_x und I_z in Abhängigkeit von ω_{\max} und den Maßen des Telefons auf. Führen Sie das Kipp-Experiment bezüglich der drei Hauptachsen Ihres Smartphones (x -, y - und z -Achse) durch und bestimmen Sie anhand der maximalen Winkelgeschwindigkeit auch empirisch die drei Trägheitsmomente I_x, I_y und I_z Ihres Smartphones. Vergleichen Sie Ihre empirischen Ergebnisse mit den rechnerischen Ergebnissen aus Aufgabe 3b).

Freie Rotation

Im Folgenden betrachten wir nun den zentralen Bewegungsvorgang, den Sie in diesem Experiment untersuchen sollen: Ein Smartphone wird per Hand bezüglich einer seiner drei Hauptkoordinatenachsen (Ursprung des Koordinatensystems im Schwerpunkt des Smartphones) in Rotation versetzt und anschließend frei fallen gelassen. Unter der Annahme, dass während des Falls auf den Schwerpunkt kein äußeres Drehmoment z. B. durch Luftwiderstand wirkt, gelten die Eulerschen Gleichungen

$$I_x \dot{\omega}_x = -(I_y - I_z) \omega_y \omega_z$$

$$I_y \dot{\omega}_y = -(I_x - I_z) \omega_x \omega_z$$

$$I_z \dot{\omega}_z = -(I_y - I_x) \omega_x \omega_y$$

welche den Zusammenhang zwischen Winkelgeschwindigkeiten und Drehimpulsen als Differentialgleichungen erster Ordnung beschreiben. (Für eine Herleitung dieser Gleichungen wird auf die einschlägige Literatur oder das Paper von Wheatland et al. verwiesen.)

Interessant ist nun natürlich mit Blick auf die eingangs formulierte Aufgabenstellung, welche stabilen Zustände für die Rotationsbewegungen theoretisch möglich sind. Ein solcher stabiler Zustand liegt vor, wenn die Winkelgeschwindigkeiten entlang der drei Hauptkoordinatenachsen zeitlich konstant sind, d. h. $\dot{\omega}_x = \dot{\omega}_y = \dot{\omega}_z = 0$. Da die Trägheitsmomente I_x, I_y und I_z im Allgemeinen verschieden sind, kann dies bei gleichzeitiger Gültigkeit der drei Eulerschen Gleichungen nur bedeuten, dass

$$\omega_y \omega_z = \omega_x \omega_z = \omega_x \omega_y = 0$$

erfüllt sein muss. Jenseits der trivialen Lösung $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$ ist dies nur möglich, wenn genau einer der drei Fälle eintritt: $\omega_x \neq 0, \omega_y = 0$ oder $\omega_z = 0$, wobei die beiden jeweils anderen Winkelgeschwindigkeiten gleich 0 sind. Das heißt, dass stabile Rotationen nach diesen Überlegungen nur genau dann möglich sind, wenn der Körper (das Smartphone) genau um die x -, y - oder z -Achse rotiert, denn eine Rotation mit Anteilen bezüglich mehr als einer Hauptrotationsachsen hätte eine zeitliche

Änderung der Winkelgeschwindigkeit zur Folge, die zu einer Instabilität der Gesamtrotation führen würde.

Tatsächlich kann sogar gezeigt werden, dass nicht einmal die drei gefundenen Kandidaten (Rotation um x -, y - oder z -Achse) alle eine stabile Rotation ermöglichen. Dies sollen Sie im Folgenden selbst zeigen.

Vorbereitende Aufgaben zur freien Rotation:

3d) Beweisen Sie, dass es für die Eulerschen Gleichungen für die Rotation eines starren Körpers mit drei unterschiedlichen Trägheitsmomenten (I_x, I_y und I_z paarweise verschieden) ohne einwirkendes Drehmoment nur zwei stabile Rotationsbewegungen gibt. Nehmen Sie o.B.d.A an, dass $I_x < I_y < I_z$.

- Betrachten Sie getrennt die drei Fälle, dass zum Zeitpunkt 0 eine Rotation um die x -, y - bzw. z -Achse eingeleitet wird und es dabei kleine zeitabhängige Störungen $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ mit $|\varepsilon_i| \ll \frac{L}{I_x}$ für $i = x, y, z$ gibt. Substituieren Sie also in den Eulerschen Gleichungen ω_i durch $\omega_i + \varepsilon_i$.
- Stellen Sie dann durch geeignete Kombination der Gleichungen und Substitutionen eine neue Differentialgleichung für die ε_i auf und suchen Sie nach Lösungen dieser Differentialgleichung.
- Interpretieren Sie diese Lösungen im physikalischen Kontext.

Kontrolllösung: Sie sollten zeigen können, dass bei den getroffenen Annahmen eine Rotation um die y - und z -Achse stabil ist, während eine Rotation um die x -Achse instabil ist. Instabil bezüglich einer Rotation um die x -Achse meint dabei, dass bereits kleine Störungen ε_y und ε_z dazu führen, dass diese exponentiell anwachsen. Stabil z. B. bezüglich der z -Achse meint hingegen, dass kleine ε_x und ε_y nicht exponentiell anwachsen, sondern eher zu kleinen Oszillationen führen.

3e) Treffen Sie auf Basis der Ergebnisse aus Aufgabe 3d) eine Vorhersage, wie sich die Winkelgeschwindigkeiten der drei Hauptachsen Ihres Smartphones verhalten werden, wenn Sie eine Rotation um die x -, y - oder z -Achse einleiten. Skizzieren Sie qualitativ die zu erwartenden Winkelgeschwindigkeits-Zeit-Diagramme für alle drei Koordinatenachsen je Rotationsbewegung (Rotation um die x -, y - oder z -Achse).

Inhaltliche Vorbereitung II

4. **Lesen Sie die Anleitung für die App *phyphox* (Hilfestellung (I)). Probieren Sie den Workflow** mit den Daten aus einem beliebigen Sensor (z. B. Beschleunigung mit/ohne g) **einmal aus**. Probieren Sie aus, wie Sie diese Daten in Ihr Programm zur Datenauswertung einlesen können.
5. **Lesen Sie die Anleitung für den Umgang mit Jupyter. (Hilfestellung (II)). Im Notebook finden Sie die Grundlagen zur Verarbeitung und Darstellung der Daten.** Mit diesen Grundlagen sollte die Analyse der Daten Ihres Experiments gut gelingen. Beachten Sie, welche Parameter für die Analyse wichtig sind und welche Fehlerquellen auftreten könnten. **Nutzen Sie alternativ SciDAVis oder OriginLab zur Auswertung der Daten, lesen Sie Hilfestellung (III).**

Das Experiment

Nach der Vorbereitung können Sie Ihr Experiment planen und durchführen. Ihre Aufgabe ist wie eingangs beschrieben, **die Rotationseigenschaften und die Stabilität der einzelnen Rotationsachsen Ihres Smartphones im freien Fall zu untersuchen und zu beschreiben. So sollen dabei auch Hypothesen aufstellen und testen, wie sich das Anbringen zusätzlicher Gegenstände ans Smartphone (d. h. eine Modifikation der Form und Masseverteilung Ihres Drehkörpers) auf die Drehung auswirkt.**

Konkret ergeben sich daraus folgende Teilaufgaben:

- Ermitteln Sie mit der Kippbewegung zunächst experimentell das Trägheitsmoment Ihres Smartphones bezüglich einer Rotation um die drei Hauptachsen (s. Vorbereitungsaufgabe 3c).
- Versetzen Sie Ihr Smartphone in unterschiedliche Rotationen (um die drei Hauptrotationsachsen) und lassen Sie es dann frei fallen. Verwenden Sie die Sensoren Ihres Smartphones, um diesen Bewegungsvorgang aufzuzeichnen. Stellen Sie die Winkelgeschwindigkeit, die Rotationsenergie und den Drehimpuls der jeweiligen Rotation im zeitlichen Verlauf graphisch dar.
- Identifizieren Sie auf Basis Ihrer Datenauswertung stabile und instabile Rotationsachsen und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit Ihren Vermutungen aus der Vorbereitungsaufgabe 3e). Prüfen Sie auch, inwieweit während des Bewegungsvorgangs Energie und Drehimpuls erhalten bleiben.
- Stellen Sie gezielt Hypothesen auf, wie Sie durch das Anbringen zusätzlicher Objekte an Ihr Smartphone dessen Rotationseigenschaften modifizieren können. Berechnen Sie die neuen Trägheitsmomente des zusammengesetzten Körpers. Führen Sie dann erneut Messungen und die Datenauswertung durch, um Ihre Hypothesen zu testen. Sie können z. B. versuchen eine instabile Rotationsachse in eine stabile Rotationsachse bzw. eine stabile Rotationsachse in eine instabile Rotationsachse umzuwandeln.

Achtung! Sicherheitshinweise:

- In dieser Aufgabe versetzen Sie Ihr Smartphone in eine Rotationsbewegung im freien Fall. Achten Sie daher auf eine weiche Unterlage und seien Sie vorsichtig bei der Durchführung, um Schäden an Ihrem Smartphone zu vermeiden.
- Beim Anbringen verschiedener Objekte an Ihr Smartphone empfiehlt es sich, das Smartphone in eine durchsichtige Plastiktüte zu wickeln, und diese an anderen Gegenständen zu befestigen, um z. B. Kratzer am Smartphone zu vermeiden.

Leitfragen für den Experimentierprozess

Zur Strukturierung Ihres Experimentierprozesses können Sie sich an folgenden Leitfragen orientieren:

1. Welche Messunsicherheiten treten bei der Ermittlung der Trägheitsmomente Ihres Smartphones (sowohl beim rechnerischen als auch beim experimentellen Zugang) auf und welchen Einfluss hat dies auf die spätere Datenauswertung?
2. Welchen Einschränkungen (z. B. Messunsicherheiten, Messbereich) unterliegen die von Ihnen verwendeten Sensoren? Welche Auswirkungen hat dies auf Ihr Vorgehen?
3. Welchen Einfluss haben die Ausgangslage Ihres Smartphones vor der Rotation und die Art und Weise, wie das Smartphone in Rotation versetzt wird, auf die eigentliche Rotationsbewegung?
4. Inwieweit können Sie Messvorgänge reproduzieren und die Messwiederholungen später in der Datenauswertung berücksichtigen?
5. Welche weiteren Messunsicherheiten treten bei der Experimentdurchführung auf? Wie lassen sich diese quantifizieren?

Leitfragen während und nach der Auswertung

Während der Auswertung können Sie ferner an folgenden Leitfragen orientieren:

1. Welcher Teil des Datensatzes ist für die weitere Datenauswertung (ir-)relevant?
2. Wie schätzen Sie die Präzision der experimentell und rechnerisch bestimmten Trägheitsmomente Ihres Smartphones ein? Welchen Einfluss hat dies auf Ihre Ergebnisse?
3. Wie können Sie die ermittelten Winkelgeschwindigkeiten sinnvoll graphisch darstellen?
4. Inwieweit liegen die Winkelgeschwindigkeiten in einer realistischen Größenordnung?
5. Woran können Sie für eine Rotation um eine der drei Hauptrotationsachsen des Smartphones in den gemessenen Winkelgeschwindigkeiten erkennen, ob die Rotation stabil bzw. instabil war?
6. Wie können Sie aus Ihren Messdaten auf die Rotationsenergien und Drehimpulse schließen, diese sinnvoll graphisch darstellen und die Gültigkeit der Erhaltungssätze für die unterschiedlichen Rotationsachsen prüfen? Denken Sie auch darüber nach, inwieweit sich die Stabilität bzw. Instabilität der Rotationsachsen in den Werten für die Rotationsenergie und den Drehimpuls widerspiegeln sollten.
7. Wie können Sie die identifizierten und quantifizierten Messunsicherheiten in den einzelnen Schritten der Auswertung berücksichtigen („Fehlerrechnung“)?
8. Welche Hypothesen bezüglich des Einflusses der Eigenschaften Ihres Rotationskörpers auf dessen Rotationsbewegung können Sie aus Ihrer Datenauswertung ableiten? Welche experimentellen Modifikationen bieten sich an, um diesen Hypothesen zu testen?

Bewertung

Erstellen Sie ein wissenschaftliches Poster, auf dem Sie Ihre Ergebnisse zusammenfassen. Dieses sollte unter anderem folgende Aspekte enthalten:

- Informationen zu Design, Durchführung und Auswertung des Experiments
- Visualisierungen der Winkelgeschwindigkeiten, Drehimpulse und Rotationsenergien für unterschiedliche Rotationsachsen
- Begründete Entscheidung, welche Rotationsachsen Ihres Smartphones (in-)stabil sind und welchen Einfluss dabei die von Ihnen vorgenommenen Modifikationen an Ihrem Rotationskörper haben.

(I) Anleitung für phyphox

phyphox ist eine kostenfreie App, mit der sämtliche Daten der im Smartphone verbauten Sensoren ausgelesen werden können. Im Folgenden finden Sie eine Schritt-für-Schritt-Anleitung, wie Sie diese App zur Aufnahme von Messdaten nutzen können.

Download: in allen gängigen App-Stores

1. Schritt: Experiment starten

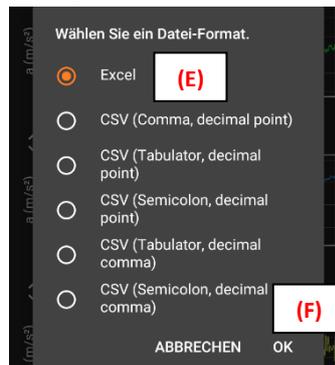
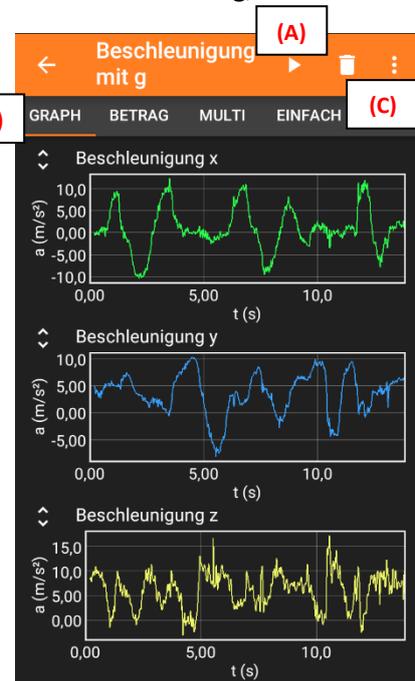
- 1.1 Starten Sie die App auf Ihrem Smartphone.
- 1.2 Auf der Startseite werden sämtliche Sensoren angezeigt, die Sie auslesen können. Wählen Sie den gewünschten Sensor.

2. Schritt: Daten aufnehmen

- 2.1 Klicken Sie den Play-Button (▶), um die Datenaufnahme zu starten (A).
- 2.2 In den Tabs werden Ihnen die Daten in Echtzeit graphisch und numerisch dargestellt (B).
- 2.3 Klicken Sie den Pause-Button (⏸), um die Datenaufnahme zu pausieren/stoppen.

3. Schritt: Daten speichern

- 3.1 Klicken Sie auf die drei Punkte (⋮), um das Menü zu öffnen (C). Wählen Sie **Daten exportieren** (D).
- 3.2 Wählen Sie das gewünschte Datenformat (in der Regel *Excel*) (E). Drücken Sie **OK** (F).
- 3.3 Mit Netz oder W-Lan Netz ist das Versenden per Mail am effektivsten. In diesem Fall müssen Sie die Daten nicht auf Ihrem Telefon speichern.
- 3.4 Ansonsten speichern Sie die Datei im gewünschten Programm (dem lokalen Speicher oder einer Dateiverwaltungsapp wie *Total Commander*, die die Datei entgegennimmt).
- 3.5 Übertragen Sie die Datei per Kabel, *Bluetooth*, *Airdrop* oder Internet auf den Auswertungsrechner.

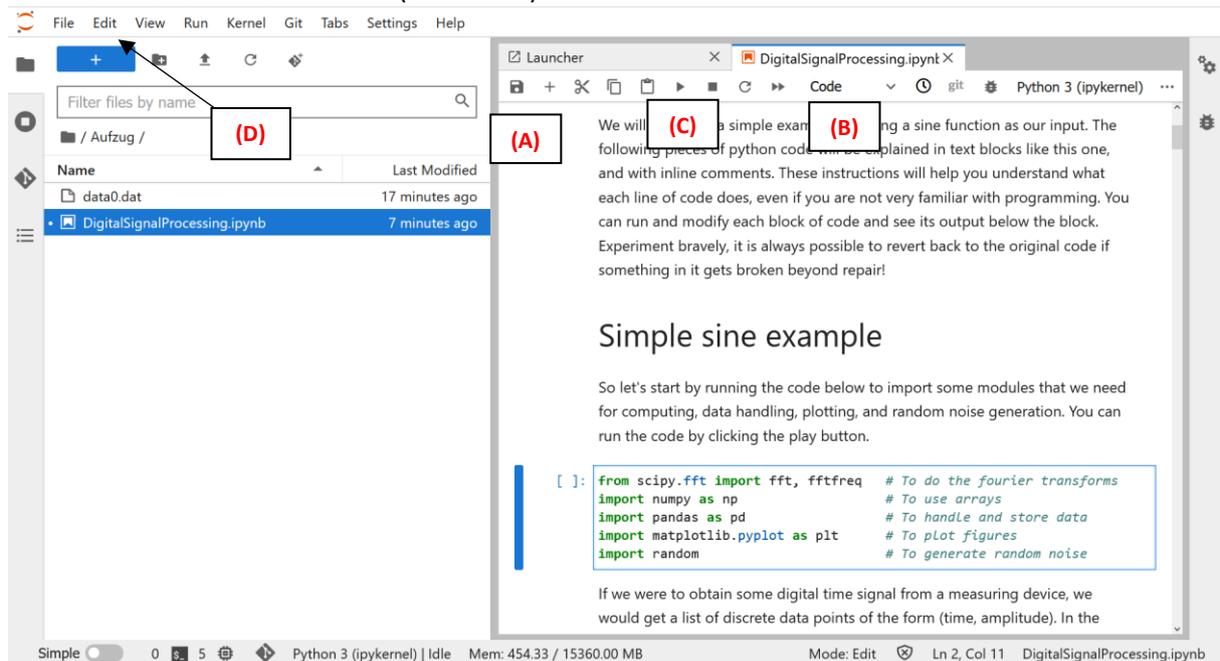


(II) Anleitung für Python

Mit Python nutzen Sie eine beliebte Programmiersprache in der Wissenschaft. Python ist somit ein Werkzeug, mit dem die Analyse der Experimentierdaten erfolgen kann. Unabhängig von der Plattform, auf der Sie Python benutzen, laden Sie bitte das zugehörige Notebook hoch und führen die ersten Schritte zum Ausprobieren der notwendigen Werkzeuge aus.

1. Schritt: Jupyter und Python

- 1.1 Nachdem Sie *jupyter* über *Launch Server* gestartet haben, sehen Sie den Startbildschirm. Rechts können Sie verschiedene Programme starten. Wir arbeiten mit *Python Notebooks*.
- 1.2 In der linken *Sidebar* gibt es einen Überblick über Ihre Dateien. Hier können Sie einen Ordner für ihr Projekt erstellen und mit einem Rechtsklick verschiedene Optionen vornehmen. Der Programmcode kann auf Dateien (z.B. Rohdaten) in diesem Verzeichnis zugreifen und hier Auswertungsdateien ablegen.
- 1.3 Laden Sie die Datei **rotation_and_rolling_notebook_german.ipynb** hoch und starten Sie diese.
- 1.4 Die Datei besteht aus verschiedenen Zellen, die Sie über (A) hinzufügen können. Mit (B) ändern Sie die Art der Zellen, wobei zum Programmieren die Art „Code“ gewählt werden muss.
- 1.5 In eine Codezelle kann nun ein Programm geschrieben werden. Kompiliert wird dieses über den Play-Button (C) oder durch die Tastenkombination Shift + Enter bzw. Strg + Enter. Einmal kompiliert bleiben die Variablen für das gesamte Notebook erhalten, bis sie überschrieben werden oder das Notebook beendet wird (Shutdown).



2. Schritt: Nutzung des selbsterklärenden Notebooks

- 2.1 Erarbeiten Sie die Inhalte des Notebooks, um die Datenverarbeitung mit Python nachvollziehen zu können.

3. Schritt: Bereitstellung der Daten für Python

- 3.1 Erstellen Sie in dem Verzeichnis in *jupyter*, in dem Sie arbeiten, ein Textfile. Zur Markierung können Sie die Dateiendung *.dat* auswählen.
- 3.2 Öffnen Sie die Excel Datei mit ihren Daten. Kopieren Sie die relevanten Datenspalten in eine Datei des Texteditors (z. B. Textfile bei *jupyter*).
- 3.3 Entfernen Sie leere Zeilen und Buchstabenketten und ersetzen Sie die Dezimalkommata mit Punkten (strg + f oder edit (D)>> Find...)

(III) Anleitung für SciDAVis

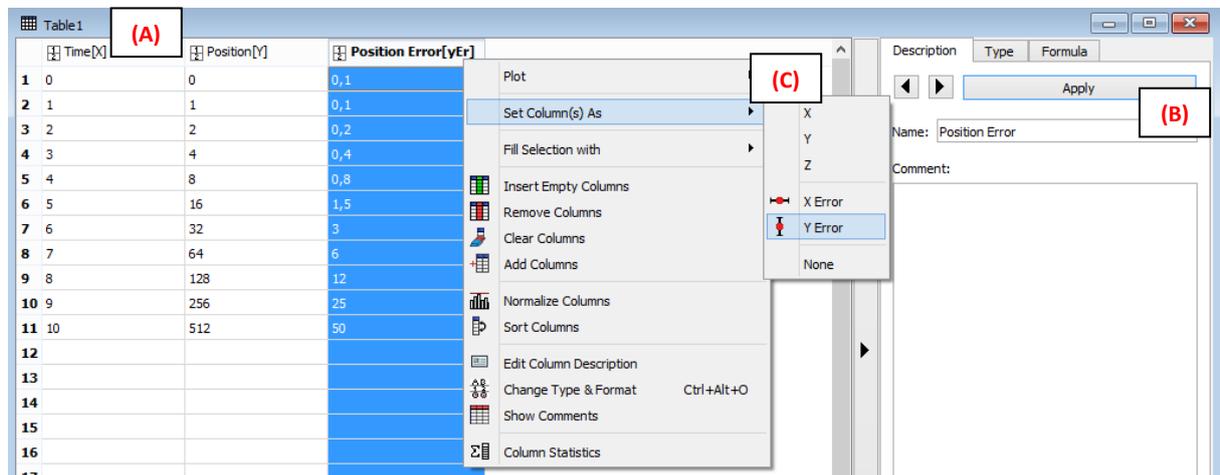
SciDAVis ist ein kostenfreies Datenanalysetool ähnlich wie die lizenzierten Tools *Origin Pro* oder *qtplot*. Im Folgenden finden Sie eine Schritt-für-Schritt-Anleitung, wie Sie dieses Tool zum Fitten verschiedener Formeln in einem Datensatz nutzen können.

Download für Windows: <https://sourceforge.net/projects/scidavis/>

Download für Mac: <https://sourceforge.net/projects/scidavis/files/SciDAVis-beta/>

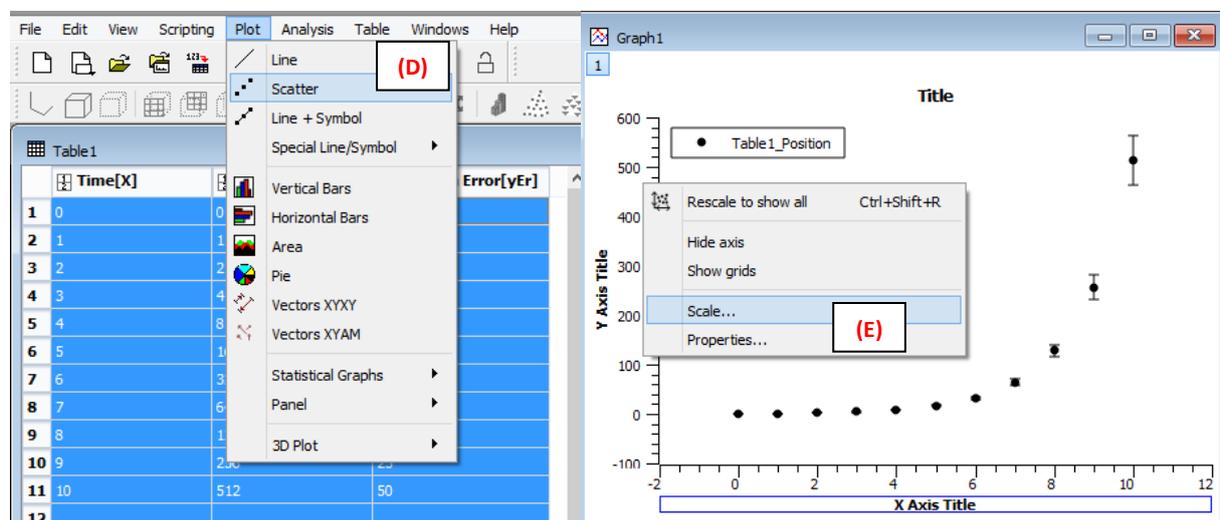
1. Schritt: Importieren Sie Ihre Daten

- 1.1 Extrahieren Sie die Daten von Ihrem Messwerterfassungsgerät. Kopieren Sie die Daten nach *Excel*.
- 1.2 Wählen Sie die Daten, die Sie analysieren möchten. Kopieren Sie sie in die Tabelle in *SciDAVis* (A).
(Achtung: *SciDAVis* kann nur Spalten unterscheiden und nicht wie *Excel* auch Reihen oder einzelne Zellen.)
- 1.3 Rechts können Sie je Spalte die Einstellungen anpassen. Achten Sie darauf, dass als **Type** stets **numeric** ausgewählt ist. Klicken Sie **Apply**, um Änderungen zu speichern (B).
- 1.4 Per Rechtsklick auf die Kopfzeile und Auswählen von **Set Column(s) as** können Sie bestimmen, welche Spalten *x*-, *y*-, *x*-Fehler- und *y*-Fehlerdaten enthalten sollen (C).



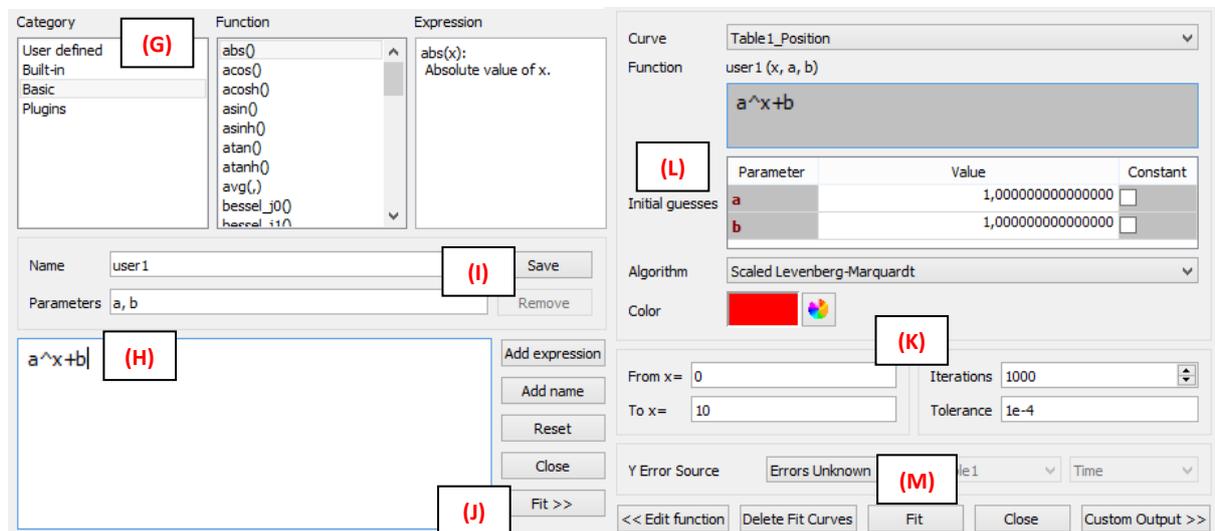
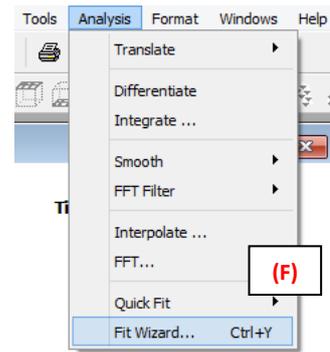
2. Schritt: Plotten Sie Ihre Daten

- 2.1 Markieren Sie die Spalten, die Sie plotten wollen. Klicken Sie in der Menüleiste auf **Plot** → **Scatter** (D).
- 2.2 Per Rechtsklick auf die Achsen oder den Hintergrund und Auswählen von **Scale...** bzw. **Properties...** können Sie das Layout Ihres Graphen anpassen oder ungewünschte Fits löschen (E).



3. Schritt: Fitten Sie Ihre Daten

- 3.1 Klicken Sie auf Ihren Graphen. Wählen Sie in der Menüleiste **Analysis** → **Fit Wizard...** (F).
- 3.2 Wählen Sie **User defined** in der linken Spalte des sich neu geöffneten Fensters (G).
- 3.3 Wählen Sie einen Namen für Ihre Fitfunktion, listen Sie die von Ihnen gewünschten Parameter getrennt durch ein Komma auf und fügen Sie die Formel Ihrer Fitfunktion im großen Feld darunter hinzu (H).
- 3.4 Klicken Sie **Save** (I) für eine spätere Nutzung der Funktion. Klicken Sie **Fit >>** (J), um die Funktion auf Ihren Graphen anzuwenden.
- 3.5 Passen Sie, falls erforderlich, die Einstellungen für den Fit an (z. B. den Bereich der berücksichtigten Datenpunkte, die Iterationen und Toleranz des Algorithmus oder die Quelle für die y-Fehler) (K).
- 3.6 Nutzen Sie **initial guesses** (L), um dem Algorithmus zu sagen, welche Werte Sie theoretisch jeweils für die Parameter erwarten. Abhängig von Ihrer Eingabe werden die Fits verschieden sein.
- 3.7 Klicken Sie unten auf **Fit** (M). Schließen Sie das Fenster.



4. Schritt: Evaluieren Sie Ihren Fit

- 4.1 Das Fenster **Results Log** erscheint automatisch und erhält verschiedene Informationen über die genutzten Daten und Fitfunktionen (N), den Algorithmus (O) und ob dieser erfolgreich war (P).
- 4.2 Sie können auch die Parameter Ihres Fits mit einem Fehlerbereich (Q) finden, welcher aus der Position der Datenpunkte und der y-Fehler berechnet wurde.
- 4.3 Sie können auch das Bestimmtheitsmaß R^2 (R) finden, welches auf einer Skala von 0 (schlechtester Fall) bis 1 (optimaler Fall) beschreibt, wie gut die Daten zum Model (genutzte Fitformel) passen.

