Physik Engines

Ein Bericht über ein physikalisches Experiment

Ilimea Gall  
gallili1@students.zhaw.ch

Dominik Müller  
muelldo9@students.zhaw.ch

ZHAW – School of Engineering

Dozent: Kurt Pernstich

Klasse: IT21tb\_WIN

Lehrgang: Physik Engines (FS24)

**Aussage zu Anpassungen nach Abgabe 2**

Nach der Abgabe des Berichtes sind einige Teil überarbeitet worden, um auch den dritten Teil zu berücksichtigen.

Folgende Abschnitte wurden mit zusätzlichen Informationen ergänzt:

**1. Zusammenfassung**

**7. Quellenverzeichnis**

Folgende Abschnitte wurden zusätzlich zum bestehenden Inhalt hinzugefügt:

**2.4. Inelastischer Stoss**

**2.5. Rotation**

**3.4. Inelastischer Stoss**

**3.5. Rotation**

**4.2. Experiment-Teil ohne leichtem Würfel**

**5.4. Inelastischer Stoss**

**5.5. Rotation**

**6. Rückblick und Lehren aus dem Experiment**

Inhaltsverzeichnis

[1. Zusammenfassung 4](#_Toc167371878)

[2. Aufbau des Experiments 4](#_Toc167371879)

[2.1. Harmonische Schwingung 4](#_Toc167371880)

[2.2. Beschleunigung durch Wind 4](#_Toc167371881)

[2.3. Elastischer Stoss 4](#_Toc167371882)

[2.4. Inelastischer Stoss 4](#_Toc167371883)

[2.5. Rotation 5](#_Toc167371884)

[3. Physikalische Beschreibung 5](#_Toc167371885)

[3.1. Harmonische Schwingung 5](#_Toc167371886)

[3.2. Beschleunigung durch Wind 5](#_Toc167371887)

[3.3. Elastischer Stoss 6](#_Toc167371888)

[3.3.1 Feder 6](#_Toc167371889)

[3.3.2 Impulsfluss 7](#_Toc167371890)

[3.4. Inelastischer Stoss 8](#_Toc167371891)

[3.5. Rotation 9](#_Toc167371892)

[4. Implementierung 9](#_Toc167371893)

[4.1. Experiment-Teil mit leichtem Würfel 9](#_Toc167371894)

[4.2. Experiment-Teil ohne leichtem Würfel 10](#_Toc167371895)

[5. Resultate 10](#_Toc167371896)

[5.1. Harmonische Schwingung 10](#_Toc167371897)

[5.2. Beschleunigung durch Wind 11](#_Toc167371898)

[5.3. Elastischer Stoss 12](#_Toc167371899)

[5.3.1 Feder 12](#_Toc167371900)

[5.3.2 Impulsfluss 12](#_Toc167371901)

[5.3.2 Energien 14](#_Toc167371902)

[5.4. Inelastischer Stoss 15](#_Toc167371903)

[5.5. Rotation 15](#_Toc167371904)

[6. Rückblick und Lehren aus dem Experiment 15](#_Toc167371905)

[7. Quellenverzeichnis 15](#_Toc167371906)

[8. Anhang 16](#_Toc167371907)

[8.1. Code leichter Würfel 16](#_Toc167371908)

[8.2. Code schwerer Würfel 17](#_Toc167371909)

# Zusammenfassung

In diesem Bericht wird ein physikalisches Experiment vorgestellt und mithilfe von theoretischen Herleitungen und Grundlagen erklärt. Das Experiment ist in mehrere Teile unterteilt, um diverse physikalische Themen einzubeziehen und zu behandeln. Darunter fallen eine harmonische Schwingung, eine Beschleunigung durch einen Wind, ein elastischer, sowie auch ein inelastischer Stoss und eine Rotation. Nach der Erläuterung des durchgeführten Experimentes und der dazugehörigen Theorie, wird die konkrete Implementierung in Unity erläutert.

Anschliessend werden die Resultate diskutiert und mit der, im Bericht hergeleiteten, Theorie verglichen. Schlussendlich werden die Lehren aus dem Experiment durch einen Rückblick aufgezeigt und zusammengefasst.

# Aufbau des Experiments

Im Folgenden werden die einzelnen Teile des Experimentes vorgestellt.

## Harmonische Schwingung

Die erste Phase des Experimentes simuliert einen harmonischen Oszillator. Dabei liegt ein Würfel mit der Masse 100 [kg] auf einer reibungsfreien Oberfläche und wird durch eine Feder mit einer Federkonstante von 500 [N/m] in eine Schwingung gebracht. Vor Start des Experimentes wird der Würfel so positioniert, dass die Auslenkung der Feder 2 [m] entspricht.

Das Experiment startet, sobald der Würfel losgelassen wird. Die Federkraft zieht den Würfel zurück, wodurch eine Schwingung entsteht. Die Feder wird in der ersten Phase zweimal zusammengestaucht und wieder auseinandergezogen. Sobald die Feder nach der zweiten Stauchung ihre Ruhelage erreicht, wird der Würfel von der Feder gelöst und gelangt somit in die zweite Phase des Experimentes.

## Beschleunigung durch Wind

In der zweiten Phase verlässt der Würfel die harmonische Schwingung und es setzt ein Wind ein. Der Wind bläst konstant mit einer Geschwindigkeit von 20 [m/s] aus derselben Richtung, aus welcher der Würfel kommt. Aufgrund der Windgeschwindigkeit und dem damit zusammenhängenden Luftwiderstand, wirkt eine Kraft auf den Würfel.

## Elastischer Stoss

Der Würfel trifft anschliessend auf einen zweiten Würfel, welcher ohne Geschwindigkeit auf derselben Oberfläche ruht. Der zweite Würfel ist 200 [kg] schwer und wird im weiteren Verlauf des Berichtes daher schwerer Würfel genannt. Die dritte Phase des Experiments besteht aus dem Zusammenstoss der beiden Würfel, welcher ungefähr eine halbe Sekunde dauern soll. Der schwerere Würfel wird durch den Stoss in Bewegung gesetzt. Nach dem Stoss bewegt er sich in dieselbe Richtung, in welche der leichtere Würfel vor dem Stoss unterwegs war. Die Bewegungsrichtung des leichteren Würfels hingegen wird durch den Zusammenstoss umgedreht.

## Inelastischer Stoss

Der leichte Würfel wird ab diesem Zeitpunkt nicht mehr für das Experiment benötigt und wird ignoriert. Der schwere Würfel bewegt sich weiter und stösst mit einem L-förmigen Körper zusammen, welcher aus drei identischen Würfeln besteht, welche aneinander haften. Die Würfel sind jeweils gleich schwer, wie der schwere Würfel, was dem «L» ein gesamtes Gewicht von 600 [kg] gibt. Sobald der schwere Würfel gegen das «L» prallt, haftet er sich ebenfalls an das Gebilde und der neue Körper setzt sich durch den Stoss in Bewegung.

## Rotation

Ein Bild, das Text, Rechteck, Screenshot, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

In der obenstehenden Abbildung ist die Vogelperspektive kurz vor dem Zusammenstoss zu sehen. Sobald der schwerere Würfel mit dem «L» zusammen stösst, ergibt sich ein neuer Körper, welcher durch die bestehende Geschwindigkeit des Würfels in eine Rotation gebracht wird.

Das entstandene «S» bewegt sich drehend weiter. Dies ist das Ende des Experimentes.

# Physikalische Beschreibung

In diesem Kapitel werden die physikalischen Grundlagen der einzelnen Teilexperimente erläutert. Dabei geht es darum, die Basis der Physik, welche in dem Experiment zum Zuge kommt vorzustellen und eine theoretische Voraussage zum Experiment zu machen.

## Harmonische Schwingung

Die physikalischen Grundlagen und Herleitungen des ersten Teils des physikalischen Experimentes wurden bereits in der Vorlesung «PE03 – Kräfte» sehr ausführlich beschrieben. Daher wird hier nur kurz darauf eingegangen.

Wie bereits erläutert, wird der harmonische Oszillator durch eine Feder simuliert, welche eine Federkonstante von 500 [N/m] besitzt.

Die Kraft, welche auf den Würfel wirkt, kann mit folgender Formel berechnet werden: [1]

Dabei ist die genannte Federkonstante und entspricht dem Unterschied zwischen Auslenkung der Feder und ihrer Ruhelage:

Berechnet man die Kraft, die zum Beginn des Experiments auf den Würfel wirkt, kommt man auf folgendes Resultat:

Berechnet man die Kraft, zum Zeitpunkt des Ruhestandes der Feder, wird diese 0 [N]. Da von einer reibungsfreien Oberfläche ausgegangen wird und auch der Luftwiderstand vernachlässigbar klein ist, wird der Würfel dadurch nicht ausgebremst. Wenn daher die Feder anschliessend zusammengestaucht wird, wird im Betrag gleich gross werden wie die Auslenkung zu Beginn des Versuchs. Es wird eine Kraft erwartet, die eine harmonische Schwingung wiederspiegelt.

## Beschleunigung durch Wind

Der Würfel wird in der zweiten Phase des Experimentes mit einer konstanten Windgeschwindigkeit von 20 [m/s] angetrieben. Die daraus resultierende Kraft kann mithilfe der Formel des Luftwiderstandes definiert werden: [1]

ist dabei die Strömungsgeschwindigkeit. In unserem Fall ist dies , wodurch man die Kraft des Windes erhält:

Da sich die Geschwindigkeit des Würfels ändert und die Kraft des Windes abhängig ist von jener Geschwindigkeit, ist die Kraft nicht konstant.

Somit ist auch die Beschleunigung, welche in der zweiten Phase des Experimentes auf den Würfel wirkt nicht konstant. Diese ist nämlich direkt von der Kraft des Windes abhängig: [2]

## Elastischer Stoss

## 3.3.1 Feder

Wie in der Vorlesung «PE03 – Kräfte» vorgestellt wurde, können elastische Stösse (Stösse, in welchem sich die Körper nach der Verformung wieder in ihre ursprüngliche Form begeben) durch eine Feder simuliert werden.

In der Simulation stauchen zwei Körper, welche aufeinanderprallen, eine Feder zusammen, die zwischen den beiden Körpern liegt. Durch das Zusammendrücken der Feder fliesst Energie in sie hinein, welche sie jedoch direkt wieder loswird, indem sie die beiden Körper mit der bereits unter 3.1 vorgestellten Federkraft auseinanderstösst.

Die Auslenkung der Feder kann in einem Diagramm dargestellt werden, wobei für die Auslenkung der Feder steht und für die Zeit. Bei ist die Feder im Ruhestand und der Stoss beginnt. Die blaue Limitierung im Diagramm kennzeichnet das Ende des Stosses.

Ein Bild, das Reihe, Diagramm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 1: Federschwingung (Auslenkung/Zeit)

Der rote Teil der Kurve entspricht einer Periodendauer der Federschwingung und kann durch die Formel einer ungedämpften harmonischen Schwingung folgendermassen berechnet werden: [3]

Die Federkonstante ist in unserem Experiment noch nicht gegeben, allerdings soll der Stoss eine halbe Sekunde dauern, was der Hälfte der Periodendauer entspricht. kann mit der folgenden Umrechnung definiert werden:

Setzt man die gegebenen Werte ein, erhält man für :

Dies ist unabhängig von der Startgeschwindigkeit des Würfels und auch unabhängig von der Länge der Feder.

## 3.3.2 Impulsfluss

Wie im Aufbau des Experiments erläutert, befindet sich der schwerere Würfel vor dem Stoss in Ruhe. Sobald der leichtere Würfel mit ihm zusammenstösst, wirkt eine Kraft auf ihn und es fliesst ein Impuls. Wie in der Vorlesung «PE05 – Impuls» definiert wurde, gilt nämlich:

«Eine Kraft in Bezugsrichtung steigert die Geschwindigkeit des Körpers und somit auch dessen Impulsinhalt, daher muss ein Impulsstrom zufliessen…» [4]

Die Richtung, in welche der leichtere Würfel sich initial bewegt, ist als Bezugsrichtung festgelegt.

Der Impuls ist folgendermassen definiert: [4]

Ein Bild, das Diagramm, Text, Plan, technische Zeichnung enthält.

Automatisch generierte BeschreibungIn der genannten Vorlesung zum Impuls wurde ein elastischer Stoss zwischen zwei gleich schweren Wägen erläutert und dessen Flüssigkeitsbild vorgestellt. Dabei wurde der Stoss in zwei Teile unterteilt. Der erste Abschnitt erfolgt bis die beiden Körper gleich schnell unterwegs sind, der zweite Teil, von der gemeinsamen Geschwindigkeit bis zum kompletten Ablösen der Körper:

In unserem Experiment teilen wir den Stoss ebenfalls in diese beiden Abschnitte auf. Der Unterschied zu der Theorie in der Vorlesung besteht darin, dass bei uns die beiden Körper eine unterschiedliche Masse besitzen und daher auch eine andere Endgeschwindigkeit zustande kommt. Die nebenstehende Abbildung dient daher lediglich zur Darstellung der beiden Abschnitte des Stosses, jedoch gilt bei Schritt 2 nicht, dass v1’’ = 0 wird.

Leiten wir uns die Geschwindigkeiten her und zeichnen uns das Flüssigkeitsdiagramm auf, wird dies schnell klar.

Abbildung 2: Aufteilung elastischer Stoss

Zu Beginn des Stosses ist der Impuls lediglich für den leichteren Würfel zu berechnen (Siehe Abbildung 3). Die gemeinsame Geschwindigkeit nach dem ersten Teil des Stosses wird wie folgt definiert: [4]

Da doppelt so gross ist als und v2 = 0 ist, kann dies folgendermassen vereinfacht werden:

Im zweiten Teil des Stosses wird noch einmal derselbe Impuls fliessen. Dadurch erhält man schlussendlich das komplette Flüssigkeitsdiagramm:

Ein Bild, das Diagramm, Screenshot, Reihe, Rechteck enthält.

Automatisch generierte BeschreibungEin Bild, das Diagramm, Screenshot, Rechteck, Reihe enthält.

Automatisch generierte BeschreibungEin Bild, das Text, Screenshot, Diagramm, Reihe enthält.

Automatisch generierte BeschreibungIm Flüssigkeitsdiagramm sieht man bereits, dass die Geschwindigkeit des leichteren Würfels nach dem Stoss negativ wird, bezogen auf die Bezugsrichtung. Dies bedeutet, dass der leichtere Würfel nach dem Stoss wieder in die gleiche Richtung zurückkehrt, aus welcher er vor dem Stoss gekommen ist.

Abbildung 4: Impuls nach 1. Teil des Stosses

Abbildung 5: Impuls nach Stoss

Abbildung 3: Impuls bei t = 0

Da die gemeinsame Geschwindigkeit der ursprünglichen Geschwindigkeit beträgt und diese Differenz zweimal zum Tragen kommt, wird die Geschwindigkeit des schwereren Würfels nach dem Stoss und die des leichteren betragen.

## Inelastischer Stoss

Im vorhergehenden Abschnitt 3.3.2 wurde auf den elastischen Stoss eingegangen. Der inelastische Stoss kann vereinfacht genauso betrachtet werden, mit dem Unterschied, dass nur der erste Teil relevant ist. In Abbildung 2 werden also nur die beiden oberen Schritte betrachtet.

Auch die Formel für die gemeinsame Geschwindigkeit kann übernommen werden: Zitat

Da in diesem Falle nun dreimal so gross als und v3 = 0 ist, kann dies folgendermassen vereinfacht werden:

Betrachtet man in diesem Falle die Flüssigkeitsdiagramme zu Beginn und zu Ende des Stosses, sehen diese folgendermassen aus:

Ein Bild, das Screenshot, Diagramm, Reihe, Rechteck enthält.

Automatisch generierte BeschreibungEin Bild, das Diagramm, Reihe, Rechteck, Screenshot enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 7: Impuls nach inelastischem Stoss

Abbildung 6: Impuls bei t = 0

## Rotation

## 3.5.1 Trägheitsmoment

Um den Drehimpuls korrekt berechnen zu können, benötigen wir das Trägheitsmoment des neuen Körpers. Die beiden mittleren Würfel können kombiniert als Quader angesehen werden. Das Trägheitsmoment dessen, wird bereits in der Vorlesung «PE09 - Drehimpuls» Zitat gegeben:

Wobei der Seitenlänge eines der Würfel entspricht. ist in diesem Falle die Masse des Quaders, kann aber auch durch die Masse der einzelnen Würfel beschrieben werden. Es wäre folgendes der Fall:

Für die beiden äusseren Würfel kann der Satz von Steiner angewendet werden, welcher ebenfalls in der genannten Vorlesung erläutert wurde. Das Trägheitsmoment für einen der äusseren Würfel wäre somit:

Der Abstand ist dabei der Abstand des betrachteten Körpers zum Massenmittelpunkt. Massenmittelpunkt erläutern?

Addiert man den Trägheitsmoment des mittleren Quaders nun mit jenen der beiden äusseren Würfel, erhält man entsprechend das folgende Resultat:

## 3.5.2 Drehimpuls

# Implementierung

Die Umsetzung des Experimentes wurde in Unity durchgeführt.

Ein Bild, das Screenshot, Design enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 6: Umsetzung in Unity

## Experiment-Teil mit leichtem Würfel

Dabei wurden die beiden Körper erstellt, auf eine reibungsfreie Oberfläche gesetzt und folgendermassen initialisiert:

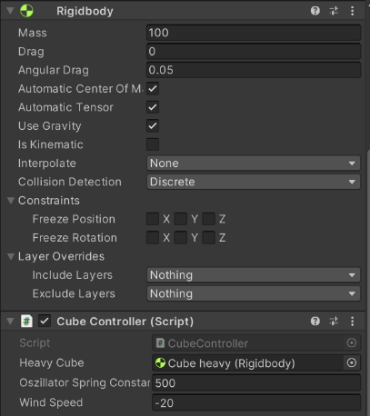
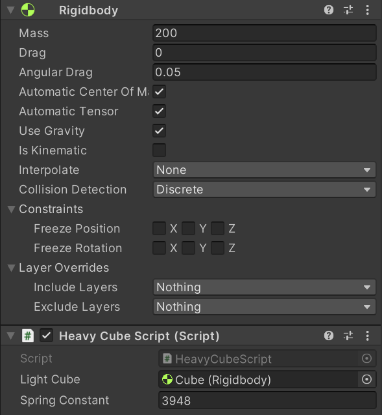


Abbildung 7: Initialisierung leichter Würfel

Abbildung 8: Initialisierung schwerer Würfel

Der leichte Würfel startet bei und die Feder, welche den Oszillator simuliert, wird so definiert, dass sich bei  die Ruhelage befindet.

Startet man das Programm, wird bei beiden Würfeln die Physik, welche von Unity vordefiniert ist, ausgestellt. Anschliessend wird das Experiment durchlaufen.

Im Skript des leichten Würfels wird, wie in Abbildung 9 gezeigt, eine Zustandsmaschine verwendet, um den Übergang der einzelnen Teile des Experimentes zu kontrollieren. In jedem Abschnitt wird die jeweilige Kraft, die auf den Würfel wirkt dementsprechend ausgerechnet.

Ein Bild, das Text, Software, Multimedia-Software, Schrift enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 9: Zustandsmaschine leichter Würfel

Da die Physik von Unity ausgestellt wurde, wird eine Kollision der beiden Würfel ignoriert und die vordefinierte Methode onCollision wird niemals ausgeführt. Im Skript des schweren Würfels wird deshalb mit folgendem Code auf eine mögliche Kollision der beiden Würfel geprüft:

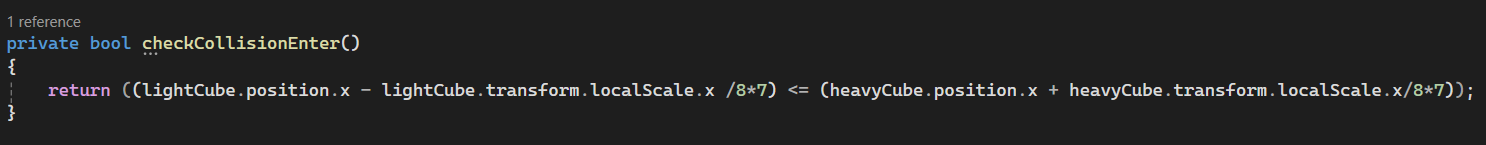


Abbildung 10: Überprüfung auf Kollision

Die Kollision beziehungsweise der Stoss beginnt bereits vor dem tatsächlichen Berühren der beiden Würfel. Dies wurde so gelöst, um eine komplette Verschmelzung der beiden Würfel zu verhindern. Dennoch wurde Entschieden, dass eine leichte Überlappung der beiden Würfel einem elastischen Stoss am nächsten kommt. Die Feder, welche zwischen den beiden Würfel eingeklemmt wird und den elastischen Stoss simuliert, wurde also ein wenig in die Würfel hineinversetzt, jedoch nicht ganz. Deswegen wurde die Grösse der Würfel mit 7/8 multipliziert.

Es wird mit einer ähnlichen Methode überprüft, wann die Kollision respektive der Stoss vorbei ist. Nur während der Kollision wird für den schweren Würfel eine Kraft berechnet, da nur in dieser Zeit die Federkraft auf ihn wirkt. Es wurde dabei beachtet, dass die Federkraft für beide Würfel gleich gross ist, jedoch in die entgegengesetzte Richtung zeigt.

In beiden Skripts werden die benötigten physikalischen Werte pro Zeitabschnitt berechnet und schlussendlich in eine CSV-Datei exportiert. (Zeit: t, x-Koordinate: x(t), Geschwindigkeit: v(t), Kraft: F(t) (added), Impuls: p(t), Energie: E(t))

Diese Daten werden im nächsten Kapitel verwendet, um die tatsächlichen Werte mit den in Kapitel 3 besprochenen Voraussagen und Erwartungen zu vergleichen.

## Experiment-Teil ohne leichtem Würfel

# Resultate

## Harmonische Schwingung

Wenn die Kraft pro Zeit aus dem umgesetzten Programm gezogen wird, erhält man folgendes Diagramm:

Abbildung 11: Kraft pro Zeit Diagramm harmonische Schwingung

Man sieht bei , dass die in 3.1 berechnete Kraft zum Start des Experimentes korrekt ist. Die Kraft stellt eine Schwingung dar, welche jeweils von 1000 [N] bis -1000 [N] reicht und nicht ausgebremst wird. Die Resultate der ersten Phase des Experimentes stimmen mit den aufgestellten Erwartungen überein.

## Beschleunigung durch Wind

Nach der ersten Phase bewegt sich der Würfel in die negative x-Richtung, seine Geschwindigkeit ist somit ebenfalls negativ. Die Beschleunigung des Würfels, welche ebenfalls in die negative x-Richtung zeigt, ist durch den Luftwiderstand nicht konstant und sieht in unserem Experiment folgendermassen aus:

Abbildung 12: Beschleunigung und Geschwindigkeit pro Zeit

Wie man in dem Diagramm sehen kann, wird der Betrag der Beschleunigung kleiner, je grösser die Geschwindigkeit des Würfel in die entsprechende Richtung wird. Die Resultate der zweiten Phase des Experimentes entsprechen also den in 3.2 aufgestellten Erwartungen.

## Elastischer Stoss

## 5.3.1 Feder

Die Federkonstante wurde wie in 3.3.1 hergeleitet mit 3478 [N/m] initialisiert.

In der Tabelle 1 befindet sich ein Auszug aus den gemessenen Angaben des schwereren Würfels. Wenn man die Spalte der Kraft betrachtet, kann man erkennen, wie lange der Stoss des Experimentes dauerte. Zieht man den Endwert des Stosses (t = 6.659995) vom Anfangswert (t = 6.259995) ab, erhält man 0.4 [s]. Dies entspricht nicht ganz den erwarteten Zeit, kann aber wie folgt erklärt werden:

In der physikalischen Herleitung wurde von einer Feder ausgegangen, welche an einem Ende «befestigt» ist und am anderen Ende mit einem Körper in Schwingung gebracht wird. In unserem Beispiel ist dies jedoch nicht korrekt, da sich die Feder mit den beiden Würfeln mitbewegt und dadurch gedämpft wird. Dadurch ist ihre Schwingung nicht diejenige einer ungedämpften harmonischen Schwingung, sondern wird durch die genannte Verschiebung verändert. Sie muss als Annäherung angesehen werden.

Tabelle 1: Auszug der Daten des schwereren Würfels: elastischer Stoss

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| t | x(t) | v(t) | F(t) |
| 6.239995 | -9 | 0 | 0 |
| 6.259995 | -9 | 0 | -520.6954 |
| 6.279995 | -9.001041 | -0.05206953 | -1029.058 |
| 6.299995 | -9.004141 | -0.1549753 | -1513.044 |
| 6.319995 | -9.010266 | -0.3062797 | -1961.189 |
| 6.339995 | -9.020314 | -0.5023986 | -2362.877 |
| 6.359995 | -9.035088 | -0.7386863 | -2708.593 |
| 6.379995 | -9.055279 | -1.009546 | -2990.147 |
| 6.399995 | -9.08145 | -1.30856 | -3200.873 |
| 6.419995 | -9.114022 | -1.628648 | -3335.777 |
| 6.439995 | -9.153267 | -1.962225 | -3391.662 |
| 6.459995 | -9.199295 | -2.301392 | -3367.204 |
| 6.479995 | -9.252057 | -2.638112 | -3262.986 |
| 6.499995 | -9.311345 | -2.964411 | -3081.474 |
| 6.519995 | -9.376797 | -3.272558 | -2826.964 |
| 6.539995 | -9.447902 | -3.555255 | -2505.492 |
| 6.559995 | -9.524017 | -3.805804 | -2124.67 |
| 6.579995 | -9.604383 | -4.018271 | -1693.52 |
| 6.599995 | -9.688135 | -4.187623 | -1222.253 |
| 6.619995 | -9.774332 | -4.309848 | -722.0325 |
| 6.639995 | -9.861973 | -4.382051 | -204.7107 |
| 6.659995 | -9.950024 | -4.402523 | 0 |
| 6.679995 | -10.03807 | -4.402523 | 0 |

## 5.3.2 Impulsfluss

Wenn man das Flüssigkeitsdiagramm aus den erhaltenen Daten aus dem Experiment aufzeichnen lässt, sieht dies wie in Abbildung 13 gezeigt aus.

Abbildung 13: Flüssigkeitsdiagramm Impuls

Die Impulse verhalten sich so, wie erwartet: die Abnahme des Impulses des leichteren Würfels entspricht der Zunahme des Impulses des schwereren Würfels, was man auch an der konstanten Linie sieht, welche den gesamten Impuls darstellt. Der Impuls des leichteren Würfels liegt schlussendlich im negativen Bereich, was ebenfalls den Erwartungen entspricht. Um die erwarteten Resultate nicht nur anhand des Diagrammes zu stützen, wird ebenfalls auf die besprochenen Endgeschwindigkeiten der Würfel eingegangen:

Sieht man sich die Daten in Tabelle 2 genauer an, kann man die Geschwindigkeiten der beiden Würfel nach dem Stoss betrachten. Für den leichteren Würfel liegt diese bei 2.210614 und für den Schwereren bei -4.402523. Wird die in 3.3 getroffene Annahme berechnet, dass die Endgeschwindigkeit des leichteren Würfels bei und jene des Schwereren bei liegen soll, kommt man auf folgende Resultate:

Man erhält somit die absoluten Fehler von und und dementsprechend die relativen Fehler von und .

Die Fehler werden als gering interpretiert und können durch Rundungsfehler, sowie zu ungenauer Messgenauigkeit entstanden sein.

Die Resultate des Impulses und die dadurch ebenfalls besprochene Endgeschwindigkeit der Würfel entsprechen also den in 3.3.2 aufgestellten Erwartungen.

Tabelle 2: Auszug elastischer Stoss

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| t leicht | v(t) leicht | F(t) leicht | t schw. | v(t) schw. | F(t) schw. |
| 6.259995 | -6.594429 | 520.6954 | 6.259995 | 0 | -520.6954 |
| 6.279995 | -6.490291 | 1029.058 | 6.279995 | -0.05206953 | -1029.058 |
| 6.299995 | -6.284479 | 1513.044 | 6.299995 | -0.1549753 | -1513.044 |
| 6.319995 | -5.981871 | 1961.189 | 6.319995 | -0.3062797 | -1961.189 |
| 6.339995 | -5.589633 | 2362.877 | 6.339995 | -0.5023986 | -2362.877 |
| 6.359995 | -5.117058 | 2708.593 | 6.359995 | -0.7386863 | -2708.593 |
| 6.379995 | -4.575339 | 2990.147 | 6.379995 | -1.009546 | -2990.147 |
| 6.399995 | -3.97731 | 3200.873 | 6.399995 | -1.30856 | -3200.873 |
| 6.419995 | -3.337135 | 3335.777 | 6.419995 | -1.628648 | -3335.777 |
| 6.439995 | -2.66998 | 3391.662 | 6.439995 | -1.962225 | -3391.662 |
| 6.459995 | -1.991647 | 3367.204 | 6.459995 | -2.301392 | -3367.204 |
| 6.479995 | -1.318206 | 3262.986 | 6.479995 | -2.638112 | -3262.986 |
| 6.499995 | -0.6656091 | 3081.474 | 6.499995 | -2.964411 | -3081.474 |
| 6.519995 | -0.0493143 | 2826.964 | 6.519995 | -3.272558 | -2826.964 |
| 6.539995 | 0.5160784 | 2505.492 | 6.539995 | -3.555255 | -2505.492 |
| 6.559995 | 1.017177 | 2124.67 | 6.559995 | -3.805804 | -2124.67 |
| 6.579995 | 1.442111 | 1693.52 | 6.579995 | -4.018271 | -1693.52 |
| 6.599995 | 1.780815 | 1222.253 | 6.599995 | -4.187623 | -1222.253 |
| 6.619995 | 2.025265 | 722.0325 | 6.619995 | -4.309848 | -722.0325 |
| 6.639995 | 2.169672 | 204.7107 | 6.639995 | -4.382051 | -204.7107 |
| 6.659995 | 2.210614 | 0 | 6.659995 | -4.402523 | 0 |
| 6.679995 | 2.210614 | 0 | 6.679995 | -4.402523 | 0 |

## 5.3.2 Energien

Vor dem Stoss hat der leichtere Würfel eine Geschwindigkeit und dadurch gespeicherte kinetische Energie. Während dem Stoss verliert er an Geschwindigkeit und gibt Energie an den schwereren Würfel ab. Beide haben anschliessend kinetische Energie. Der Ablauf ist in Abbildung 14 zu sehen. Es fällt auf, dass im Gegensatz zum Impuls die Gesamtenergie in der Mitte des Stosses nicht konstant zu bleiben scheint. Da das Energieerhaltungsgesetz allerdings besagt, dass die Energie immer erhalten wird, stellt sich die Frage, wie diese Einbuchtung zustande kommt. Die Antwort liegt bei der Implementation und dabei, dass wir zur Simulation eine Feder zwischen die beiden Würfel stellten. Diese speichert temporär diese «fehlende» Energie, bevor sie wieder an die Würfel abgegeben wird. Die totale Energie zu Beginn und zum Schluss des Stosses ist identisch und das Erhaltungsgesetz wird somit eingehalten.

Abbildung 14: kinetische Energie

## Inelastischer Stoss

## Rotation

# Rückblick und Lehren aus dem Experiment

# Quellenverzeichnis

[1] “Pernstich - 2024 - Modul PE03 - Kräfte.pdf.”

[2] “Pernstich - 2024 - Modul PE – 02 - Kinematik Bsp, Dynamik .pdf.”

[3] “Federpendel | LEIFIphysik.” Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: https://www.leifiphysik.de/mechanik/mechanische-schwingungen/grundwissen/federpendel

[4] “Pernstich - 2024 - Modul PE – 05 Impuls.pdf.”

# Anhang

## Code leichter Würfel

using System.Collections.Generic;

using UnityEngine;

using System.IO;

using System;

public enum LightCubeStatus

{

Oszillator,

Wind,

Collision

}

public class CubeController : MonoBehaviour

{

private Rigidbody lightCube;

public Rigidbody heavyCube;

public int oszillatorSpringConstant;

public float windSpeed; // m/s

private float dense = 1.225F; // kg/m^3

private float resistanceCoefficient = 1.3F;

private float springLength;

private int springConstant; // N/m

private LightCubeStatus status;

private static float MIN\_OSZILLATOR\_TIME = 4.0f;

private float currentTimeStep; // s

private List<List<float>> timeSeries;

// Start is called before the first frame update

void Start()

{

lightCube = GetComponent<Rigidbody>();

status = LightCubeStatus.Oszillator;

timeSeries = new List<List<float>>();

Physics.IgnoreCollision(heavyCube.GetComponent<Collider>(), lightCube.GetComponent<Collider>());

}

// FixedUpdate can be called multiple times per frame

void FixedUpdate() {

float forceX = 0.0f; // N

switch (status)

{

case LightCubeStatus.Oszillator:

forceX = -lightCube.position.x \* oszillatorSpringConstant;

if (currentTimeStep > MIN\_OSZILLATOR\_TIME && lightCube.position.x <= 0)

{

status = LightCubeStatus.Wind;

}

break;

case LightCubeStatus.Wind:

var area = lightCube.transform.localScale.x \* lightCube.transform.localScale.y;

forceX = 0.5f \* resistanceCoefficient \* dense \* area \* (float)System.Math.Pow((windSpeed-lightCube.velocity.x), 2) \* Math.Sign(windSpeed-lightCube.velocity.x);

break;

case LightCubeStatus.Collision:

forceX = -((lightCube.position.x - heavyCube.position.x) - springLength) \* springConstant;

break;

}

lightCube.AddForce(new Vector3(forceX, 0f, 0f));

currentTimeStep += Time.deltaTime;

var energie = 0.5f \* lightCube.mass \* (float)Math.Pow(lightCube.velocity.x,2);

timeSeries.Add(new List<float>() {currentTimeStep, lightCube.position.x, lightCube.velocity.x, forceX, lightCube.mass \* -lightCube.velocity.x,energie});

}

public void OnCollision()

{

status = LightCubeStatus.Collision;

}

//TimeSeries

void OnApplicationQuit() {

WriteTimeSeriesToCSV();

}

void WriteTimeSeriesToCSV() {

using (var streamWriter = new StreamWriter("time\_series.csv")) {

streamWriter.WriteLine("t,x(t),v(t),F(t) (added),p(t),E(t)");

foreach (List<float> timeStep in timeSeries) {

streamWriter.WriteLine(string.Join(",", timeStep));

streamWriter.Flush();

}

}

}

public void setSpringLength(float newSpringLength)

{

this.springLength = newSpringLength;

}

public void setSpringConstant(int newSpringConstant)

{

this.springConstant = newSpringConstant;

}

}

## Code schwerer Würfel

using System;

using System.Collections.Generic;

using System.IO;

using UnityEngine;

public class HeavyCubeScript : MonoBehaviour

{

private Rigidbody heavyCube;

public Rigidbody lightCube;

public int springConstant = 0; // N/m

private bool inCollision = false;

private float springLength;

private float currentTimeStep; // s

private List<List<float>> timeSeries;

// Start is called before the first frame update

void Start()

{

heavyCube = GetComponent<Rigidbody>();

timeSeries = new List<List<float>>();

Physics.IgnoreCollision(heavyCube.GetComponent<Collider>(), lightCube.GetComponent<Collider>());

}

// FixedUpdate can be called multiple times per frame

void FixedUpdate()

{

if (!inCollision && checkCollisionEnter())

{

OnCollision();

}

float forceX = 0; // N

if (inCollision)

{

if (checkCollisionExit())

{

springConstant = 0;

lightCube.GetComponent<CubeController>().setSpringConstant(springConstant);

}

// Calculate spring force for x component

forceX = ((lightCube.position.x - heavyCube.position.x) - springLength) \* springConstant;

}

heavyCube.AddForce(new Vector3(forceX, 0f, 0f));

currentTimeStep += Time.deltaTime;

var energie = 0.5f \* heavyCube.mass \* (float)Math.Pow(heavyCube.velocity.x, 2);

timeSeries.Add(new List<float>() { currentTimeStep, heavyCube.position.x, heavyCube.velocity.x, forceX, heavyCube.mass \* -heavyCube.velocity.x, energie });

}

private void OnCollision()

{

inCollision = true;

lightCube.GetComponent<CubeController>().OnCollision();

springLength = lightCube.position.x - heavyCube.position.x;

lightCube.GetComponent<CubeController>().setSpringConstant(springConstant);

lightCube.GetComponent<CubeController>().setSpringLength(springLength);

}

private bool checkCollisionEnter()

{

return ((lightCube.position.x - lightCube.transform.localScale.x /8\*7) <= (heavyCube.position.x + heavyCube.transform.localScale.x/8\*7));

}

private bool checkCollisionExit()

{

return ((lightCube.position.x - lightCube.transform.localScale.x /8\*7) > (heavyCube.position.x + heavyCube.transform.localScale.x / 8\*7));

}

//TimeSeries

void OnApplicationQuit()

{

WriteTimeSeriesToCSV();

}

void WriteTimeSeriesToCSV()

{

using (var streamWriter = new StreamWriter("time\_series\_heavy.csv"))

{

streamWriter.WriteLine("t,x(t),v(t),F(t) (added),p(t),E(t)");

foreach (List<float> timeStep in timeSeries)

{

streamWriter.WriteLine(string.Join(",", timeStep));

streamWriter.Flush();

}

}

}

}