

Experiment 10: Zwei-Kammer-Rüttler – Viele sammeln sich bei Vielen

einfach vorhanden (1x)
Stand: 27.07.2016 // v19

Phänomen

Werden Holzperlen in einer Zwei-Kammer-Box gerüttelt, sortieren sie sich von selbst und sammeln sich in einer der beiden Kammern.

Einleitung (für Schüler_innen)

Schütteln ist normalerweise ein Verfahren, um Dinge möglichst zufällig zu verteilen – dieser Versuch zeigt, dass das nicht immer so sein muss, sondern dass sich beim Schütteln Sachen auch ordnen können.

Material

- Zwei-Kammer-Box mit Trennwand (mit Klebegummi fixiert)
- bunte Holzperlen (15–20 g, Durchmesser: 6 mm) und weitere Holzperlen
- zwei Haftpads
- Lautsprecher mit Dose (Rüttler)
- zweifach Cinch zu 3,5 mm-Klinke-Adapterkabel
- Verstärker (CT-C.2 oder Shark)

Zusätzlich benötigtes Material

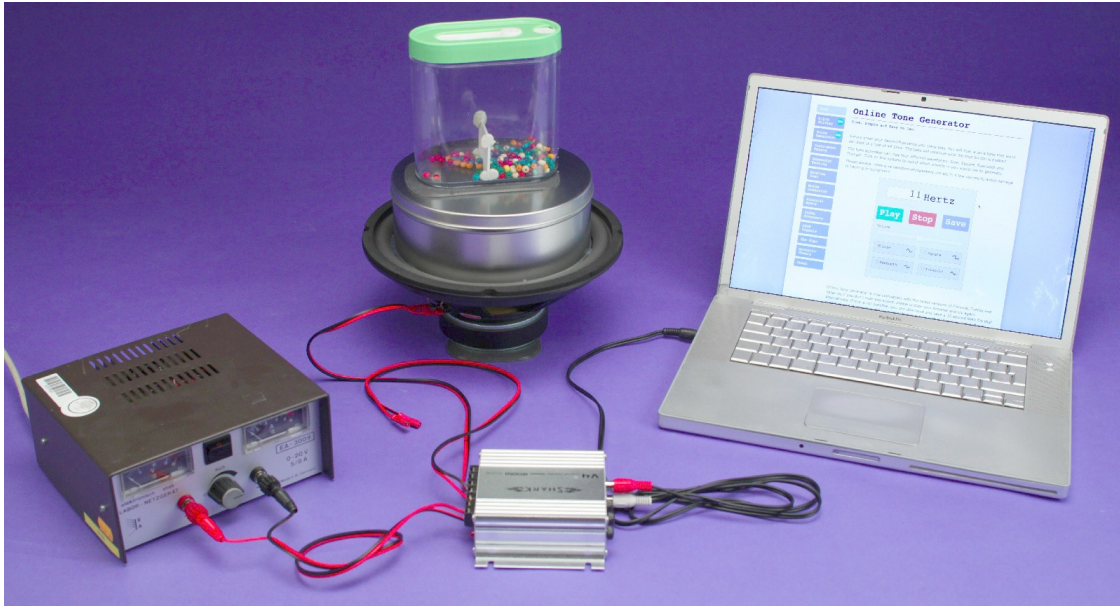
- 12 V-Gleichspannungsquelle (für Verstärker)
- Signalquelle (MP3-Player, Laptop, Smartphone, o. ä.)
- optional: Feinwaagen; Waagen mit Einteilungen bis zu 0,001 g sind günstig (ca. 10,- Euro inkl. Versand) online zu erwerben – siehe Materialliste unter www.niliphex.de. Für diesen Versuch wäre eine Einteilung bis 0,01 g sinnvoll.



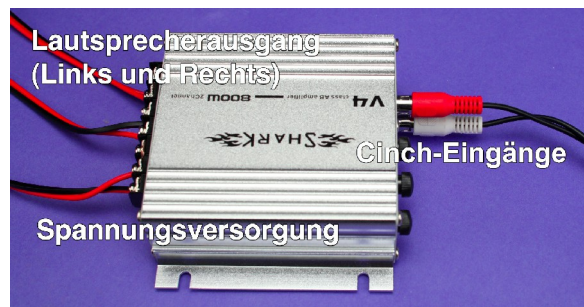
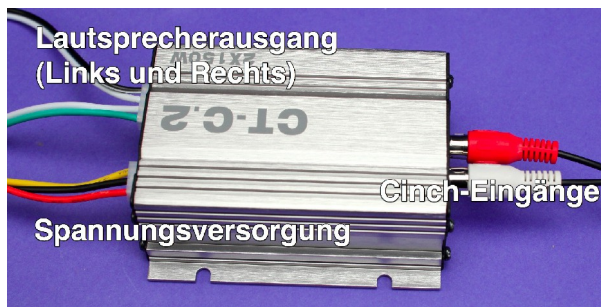
Experiment 10: Zwei-Kammer-Rüttler – Viele sammeln sich bei Vielen

Vorbereitung

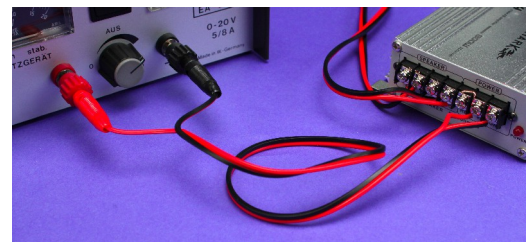
Aufbauen: Der Rüttler (Lautsprecher mit Dose) wird auf ein Haftpad gestellt. Auf die geschlossene Dose des Rüttlers wird ein weiteres Haftpad geklebt. Darauf wird die Zwei-Kammer-Box gestellt.



Verstärker: Am Verstärker sind bereits Kabel angebracht: a) zur Spannungsversorgung (eine Zwillingsleitung) und b) zum Lautsprecher (je eine Zwillingsleitung für das Signal L (Links) und R (Rechts)). Zusätzlich gibt es zwei Cinch-Eingänge für das Audiosignal.



Spannungsversorgung: Die Bananenstecker müssen an einer 12 V-Gleichspannungsquelle angeschlossen werden (schwarz an den negativen Pol und rot an den positiven Pol). Eine Unterversorgung mit einer zu niedrigen Spannung ist für den Verstärker ungefährlich, eine Überversorgung mit einer zu hohen Spannung kann den Verstärker beschädigen.



Lautsprecherverkabelung: Zwei der roten Steckschuhe müssen an den Steckverbindern am Lautsprecher angebracht werden. Es sind insgesamt vier rote Steckschuhe vorhanden (zwei für den linken Kanal und zwei für den rechten Kanal des Stereo-Verstärkers). Es muss darauf geachtet werden, dass die beiden angeschlossenen Steckschuhe vom gleichen Kanal sind.



Experiment 10: Zwei-Kammer-Rüttler – Viele sammeln sich bei Vielen

Audiosignal: Das mitgelieferte zweifache Cinch zu 3,5 mm-Klinke-Adapterkabel muss mit den passenden Buchsen am Verstärker verbunden werden (beim Shark-Verstärker vorher die Schutzkappen entfernen); ebenso der Klinke-Stecker mit einer Signalquelle (MP3-Player, Laptop, Smartphone o. ä.).

Software / Signalgenerator: Als Signalquelle können alle Geräte genutzt werden, die ein Audiosignal ausgeben (s. o.). Je nach Gerät unterscheiden sich die maximalen Ausgangslautstärken.

Für Geräte mit Internetzugang bietet sich die Nutzung dieser Webseite an:

<http://onlinetonegenerator.com/>

Darauf können verschiedene Frequenzen eingestellt und ausgegeben werden.

Es muss bedacht werden, dass Laptops und Computer auf die maximale Lautstärke geregelt werden müssen (Lautsprechereinstellungen etc. beachten), damit das Experiment funktioniert.

Alternativ können für Smartphones kostenlose Frequenzgeneratoren genutzt werden (z. B. Android: keuwl function generator; iPhone: Audio Funktionsgenerator) oder es können MP3-Dateien mit unterschiedlichen Frequenzen von www.niliphex.de heruntergeladen werden.

Einstellungen: Der Verstärker sollte auf die maximale Lautstärke eingestellt werden (GAIN bzw. LEVEL). Die Regelung der Amplitude (Lautstärke) wird dann an der Signalquelle vorgenommen. Ebenso sollten die Filter am Verstärker auf *Low* gestellt sein (CT-C.2) bzw. der *Bass* maximal verstärkt werden (Shark).



Durchführung

An der **Signalquelle** wird eine **Sinusfrequenz** von **11 Hz** (Verstärker CT-C.2) bzw. **13 Hz** (Verstärker Shark) eingestellt. Das sind die Frequenzen, bei denen die Verstärker gut arbeiten können und das Granulat in der Zwei-Kammer-Box hoch genug springen kann.

Je nach Stärke der Signalquelle lassen sich die Arbeitsbereiche A & B (schwache Quelle) oder die Arbeitsbereiche A, B & C (starke Quelle) identifizieren, wenn die Amplitude (Lautstärke) verändert wird:

- | | |
|--------------------------------|---|
| A (kleine Amplitude): | Keine der Kugeln springt über die Barriere in der Zwei-Kammer-Box. Alle Kugeln bleiben in ihrer Kammer. |
| B (mittlere Amplitude): | Ein Teil der Kugeln springt über die Barriere und kann zwischen den Kammern hin und her springen. |
| C (hohe Amplitude): | Alle Kugeln springen sehr hoch und weit über die Barriere. |

Experiment 10: Zwei-Kammer-Rüttler – Viele sammeln sich bei Vielen



Bereich A



Bereich B



Bereich C

Wenn der Bereich C nicht eingestellt werden kann, muss zum gleichmäßigen Aufteilen der Holzperlen auf die zwei Kammern (vor dem Start des Experiments) die Zwei-Kammer-Box vom Haftpad genommen und entsprechend gekippt werden.

- 1. Gleichmäßige Startverteilung (links $\approx 50\%$, rechts $\approx 50\%$):** Zum Versuchsstart werden die Kugeln gleichmäßig auf beide Kammern verteilt. Entweder durch Mischen mittels der Einstellung C oder durch Abnehmen der Zwei-Kammer-Box und Kippen (s. o.). Danach kann die Zwei-Kammer-Box mit Einstellung B geschüttelt werden.

Es lässt sich beobachten, wie sich die Kugeln zufällig auf einer Seite sammeln (bei gut eingestellten Systemen nach ca. 10 Sekunden – mit korrekter Kugelmenge und passender Amplitude – ansonsten nach ca. einer Minute).

Um sich davon zu überzeugen, dass das Ergebnis (linke oder rechte Kammer) zufällig ist, sollte dieser Versuch mehrfach durchgeführt werden. Dazu werden die Kugeln entweder per Hand neu verteilt (s. o.) oder per Einstellung C kurzzeitig gerüttelt, sodass sie sich erneut gleich verteilen.

Ein schräg gestellter Dosendeckel beim Rüttler oder ein schräger Tisch beeinflussen das Verhalten natürlich.

- 2. Ungleichmäßige Startverteilung (links $\approx 25\%$, rechts $\approx 75\%$):** Zum Versuchsstart werden die Kugeln ungleichmäßig auf beide Kammern verteilt, etwa im Verhältnis 1:3. Dies wird z. B. mittels Kippen der Zwei-Kammer-Box umgesetzt. Danach kann die Zwei-Kammer-Box mit Einstellung B geschüttelt werden. Es lässt sich beobachten, dass die Kugeln sich immer auf der Seite sammeln, wo zu Beginn mehr Holzperlen eingefüllt wurden. Um ggf. zu beweisen, dass das Verhalten nicht auf einen schrägen Aufbau hinweist, kann der Behälter um 180° gedreht und der Versuch wiederholt werden.

Mögliche Arbeitsaufträge

- Welche ist die minimale ungleichmäßige Startverteilung bei der der Versuch noch sicher funktioniert? Links 30 %, rechts 70 % oder sogar links 40 %, rechts 60 %? Anstatt durch Abzählen die Verteilung zu bestimmen, kann dafür eine Feinwaage genutzt werden.
Hierzu muss vorher festgelegt werden, was sicher funktionieren genau bedeutet: Wie lange wird bei jedem Versuch gewartet? Wie viele Durchgänge werden gemacht? Was ist die akzeptierte Fehlerrate?
- Hypothesen- / Theoriebildung:** Wodurch lässt sich dieses Verhalten erklären?

Experiment 10: Zwei-Kammer-Rüttler – Viele sammeln sich bei Vielen

Hinweise

Zu wenig Leistung / eigener Verstärker – Damit der Lautsprecher stark genug schwingt, muss eine geeignete Signalquelle genutzt werden, damit das Eingangssignal im Verstärker bereits groß genug ist (einige MP3-Player, Laptops, etc. haben eine größere Ausgangslautstärke als andere). Falls das nicht ausreicht, sollte entsprechend ein eigener Verstärker (ggf. inkl. Signalquelle) oder ein Funktionsgenerator mit Leistungsausgang verwendet werden.

Probleme mit elektrostatischer Aufladung – Um Probleme mit elektrostatischer Aufladung zu minimieren, werden statt Kunststoffperlen Holzperlen verwendet. Trotzdem kann es zu störenden elektrostatischen Aufladungen kommen, die ersichtlich werden, da die Perlen an der Scheibe der Zwei-Kammer-Box haften. Diesem Phänomen kann sehr einfach entgegen gewirkt werden, indem (falls eine elektrostatische Aufladung auftritt) in die Zwei-Kammer-Box hinein gehaucht wird. Die Luftfeuchtigkeit im Atem reduziert den elektrostatischen Effekt enorm.

Zwei-Kammer-Box rutscht vom Rüttler herunter – Falls das Haftpad bereits gereinigt wurde (Erläuterung dazu siehe Lagerungshinweise / Instandhaltung), kann die Kontaktfläche vergrößert werden, indem das Haftpad passend zugeschnitten oder ggf. doppelt gelegt wird, um vollflächig am Boden der Zwei-Kammer-Box zu haften (und nicht nur am hochstehenden Rand).

Zweiter-Lautsprecher-Erweiterung – Es ist möglich, an den Verstärker einen zweiten Lautsprecher anzuschließen, da ein Kanal des Verstärkers bisher ungenutzt ist. Damit könnten zwei Gruppen gleichzeitig experimentieren. Es müsste dazu ein zweiter Lautsprecher, eine leere Keksdose und ein weiteres Cinch-Klinke-Adapterkabel angeschafft werden. Ein Adapterkabel geht mit einem Cinchstecker auf Links (Eingang des Verstärkers), der zweite Cinchstecker wird nicht angeschlossen und das zweite Adapterkabel geht mit einem Cinchstecker auf Rechts. Der zweite Cinchstecker wird ebenso nicht angeschlossen.

Weitere Kammern / verstellbare Zwischenwand – Die Zwischenwand in der Zwei-Kammer-Box ist lediglich mit Klebegummi eingesetzt und kann nach Belieben verändert bzw. umgesetzt werden. Es können auch weitere Wände hinzugefügt werden, um eine Mehr-Kammer-Box zu bauen.

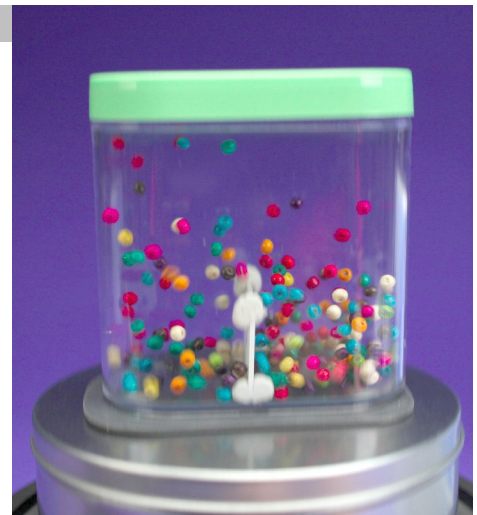
Zusammenhang mit

- ➔ Experiment 09: Entmischung beim Schütteln
- ➔ Experiment 11: Strukturbildung auf schwingender Platte

Fachlicher Hintergrund

Beim Betrieb im Modus A ist die kinetische Energie (und damit auch die Sprunghöhe), die die Kugeln erhalten, zu gering um die Barriere zu überwinden.

Im Modus B ist die kinetische Energie, die die Kugeln erhalten, in der Größenordnung, dass nur einige Kugeln die Barriere überwinden können. Die Sprunghöhe der Kugeln ist von der Beschleunigung der Bodenplatte des Rüttlers, aber auch von der Menge der benachbarten Kugeln abhängig. Wenn wenige Kugeln in der direkten Nachbarschaft sind, dann springen die Kugeln höher und können die Barriere ggf. überwinden. Wenn viele Kugeln in direkter Nachbarschaft sind, dissipieren



Experiment 10: Zwei-Kammer-Rüttler – Viele sammeln sich bei Vielen

bzw. verlieren die Kugeln kinetische Energie durch Stoßprozesse mit ihren benachbarten Kugeln, können nicht so hoch springen und folglich die Barriere nicht überwinden.

Einfach ausgedrückt: Auf der Seite, auf der sich mehr Kugeln befinden, springen die Kugeln weniger hoch, weil sie sich gegenseitig behindern und in dieser Kammer die Energie durch Stöße auf mehr Kugeln verteilt wird.

Dieses Verhalten lässt sich reproduzieren, wenn gleich zu Beginn des Experiments ungleiche Startbedingungen eingestellt werden (z. B. ein Viertel der Kugeln auf der einen Seite zu drei Viertel der Kugeln auf der anderen Seite).

Im Zustand C ist die kinetische Energie, die die Kugeln erhalten, so groß, dass alle Kugeln die Barriere überwinden können und sich gleichmäßig in der Zwei-Kammer-Box verteilen bzw. zwischen den beiden Kammern hin und her springen.

Rahmenlehrplanbezug

Aggregatzustände / ideales Gas / Teilchenmodell – Häufig werden solche Kugelkammern auch für die Verbildlichung eines Gases genutzt. Dies kann geleistet werden, wenn ein leistungsfähigerer Verstärker an das Experiment angeschlossen wird und sich die Kugeln zufällig in der gesamten Kammer verteilen. Als stark vereinfachtes Modell entspricht die Rüttelstärke der Temperatur: Wenn nicht gerüttelt wird, dann sind die Teilchen starr und fest. Wenn etwas gerüttelt wird, dann verhält sich das System ähnlich wie eine Flüssigkeit und bewegt sich hin und her. Wenn stark gerüttelt wird, dann verhält sich das System wie ein Gas.

Schall & Versuche zur Akustik – Unabhängig vom beschriebenen Experiment kann der Lautsprecher auch eingesetzt werden, um den Übergang von einer sichtbaren Sinusschwingung (wenige Hz, Verstärkerleistung fällt stark ab unter einer Frequenz von 2 Hz) zu einer hörbaren Sinusschwingung zu zeigen, indem langsam die Frequenz gesteigert wird, bis ein hörbarer Ton entsteht.

Statistische Verteilung von Ergebnissen – Der Versuch kann als Modellsystem genutzt werden für Vorgänge, die mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten behaftet sind. Solche Wahrscheinlichkeiten lassen sich nur ermitteln, indem der Versuch mehrfach durchgeführt wird.

Einsatz in der Thermodynamik / zweiter Hauptsatz der Thermodynamik – Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik lässt sich in vielen unterschiedlichen Varianten formulieren. Eine Version davon ist: *Ausgleichs- und Mischungsvorgänge sind irreversibel*. Wieso stellt dieses Experiment dazu keinen Widerspruch dar? Auflösung: Es handelt sich bei diesem Experiment um ein offenes, dissipatives System – d. h. es fließt Energie durch das System und dabei entsteht Ordnung. Der zweite Hauptsatz verbietet lediglich, dass in geschlossenen Systemen die Entropie sinkt.

Lagerungshinweise / Instandhaltung

Steckverbindungen am Verstärker nicht lösen – Die Steckkabel am Verstärker CT-C.2 sollten nicht regelmäßig gelöst werden, weil die Steckverbindungen nicht darauf ausgelegt sind und so ein Defekt entstehen könnte.

Steckschuhe am Lautsprecher nicht lösen – Die Steckverbindungen am Lautsprecher sind ebenfalls nicht auf regelmäßiges An- und Abstecken ausgelegt und sollten verbunden bleiben, um einem Defekt (Bruch an der Steckverbindung) vorzubeugen.

Experiment 10: Zwei-Kammer-Rüttler – Viele sammeln sich bei Vielen

Wenn das Haftpad nicht mehr haftet, kann es wieder instand gesetzt werden, indem es mit Wasser abgewaschen wird. Es kann auch Seife genutzt werden, aber am Ende muss das Haftpad gründlich abgespült werden. Das Haftpad haftet wieder gut, sobald es getrocknet ist.

Wegräumen – Der Lautsprecher lässt sich gut zusammen mit dem verkabelten Verstärker in einer der grünen Kisten verstauen. Die Haftpads sollten nicht in der Sonne gelagert werden, da sie nur begrenzt UV-beständig sind und bei zu großer Hitze ihre Eigenschaften verändern können.

Weiteres Material auf: www.niliphex.de

Video *Fachwissenschaftliche Untersuchung des Zwei-Kammer-Rüttler: Mik-*
kelsen, R.; van der Weele, K.; van der Meer, D.; Versluis, M.; Lohse, D.
(2003): Competitive Clustering in a Granular Gas. (engl., Dauer 3:00)
<https://www.youtube.com/watch?v=IPStV2yolq0>
(letzter Zugriff: 31.05.2016). ShortLink: <https://v.gd/Oo9uty>



Text *Selbstorganisation bei Granulaten – Schlichting, H. J.; Nordmeier, V.*
(1996): Strukturen im Sand – Kollektives Verhalten und Selbstorganisation
bei Granulaten. In: MNU, 49 (6), S. 323–332. (dt., 9 Seiten)
[https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_](https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/strukturen_im_sand.pdf)
[physik/didaktik_physik/publikationen/strukturen_im_sand.pdf](https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/strukturen_im_sand.pdf)
(letzter Zugriff: 31.05.2016). ShortLink: <https://v.gd/U3ohvR>



GEFÖRDERT VON

GESAMTMETALL
Die Arbeitgeberverbände der Metall- und Elektro-Industrie

**think
ING.**
Die Initiative für
Ingenieurwachstum

sdw
Stiftung der Deutschen Wirtschaft
Wir stiften Chancen!

Entwickelt von Joachim S. Haupt und der

Didaktik der Physik
AG Nordmeier

Freie Universität



Berlin

Lizenz der Inhalte von NiliPhEx:



– CC0 1.0 – gemeinfrei / bedingungslos



www.niliphex.de

Komplette, editierbare Dokumentation und weitere Materialien

7 / 7