

## 2.12. Stoßgesetze

### Ziel

Überprüfung der Gesetzmäßigkeiten beim elastischen Stoß in zwei Dimensionen.

### Hinweise zur Vorbereitung

Die Antworten auf diese Fragen sollten Sie vor der Versuchsdurchführung wissen. Sie sind die Grundlage für das Gespräch mit Ihrer Tutorin/Ihrem Tutor vor dem Versuch. Informationen zu diesen Themen erhalten Sie in der unten angegebenen Literatur.

- Welche Energieformen treten bei diesem Versuch auf?
  - Wie lautet folglich die hierzu passende Formulierung des Energieerhaltungssatzes?
  - Welche Energieform muss erhalten bleiben, damit man von einem „vollständig elastischen“ Stoß spricht?
  - Was besagt der Impulserhaltungssatz?
  - Was ist ein elastischer, was ein inelastischer Stoß?
- Wie ist das Trägheitsmoment definiert und was bedeutet es anschaulich?
  - Was ist eine Zykloide?

### Zubehör

- zwei zykloidenförmige Kugelbahnen mit aufgeklemmten schaltbaren Elektromagneten zum Festhalten der Kugeln
- zwei magnetische Stahlkugeln
- Rolle mit unbedrucktem Zeitungspapier
- „Kohlepapier“
- Klebeband
- Senklot
- Maßband

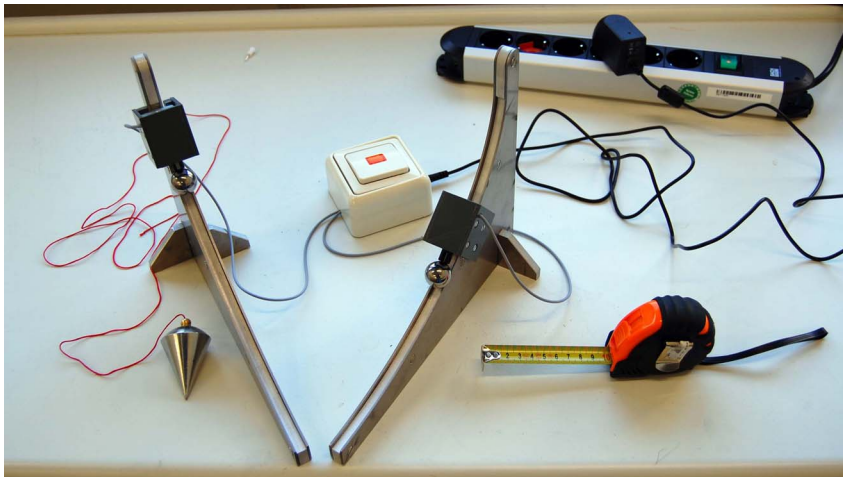


Abbildung 2.12.1.: Versuchsaufbau zum Versuch „Stoßgesetze in zwei Dimensionen“.

## Versuchsdurchführung

Abbildung 2.12.1 zeigt den Versuchsaufbau.

Hinweise:

- Wenn die Haltemagnete relativ weit unten an den Schienen befestigt sind, fallen die Kugeln nicht leicht genug ab, so dass es zu Verzögerungen kommen kann. Verwenden Sie in diesem Fall eine Papierschicht geeigneter Dicke als Abstandshalter zwischen Magnet und Kugel.
- Verwenden Sie immer zwei Kugeln mit gleicher Masse. Die grafische Auswertung für den Impulserhaltungssatz wird sonst wesentlich(!) aufwendiger.
- Zur Erleichterung des korrekten Erfassens aller relevanten Messwerte finden Sie eine vorgefertigte Messwerttabelle in Abbildung 2.12.3 auf Seite 153.

1. Wiegen Sie die benutzten Stahlkugeln.
2. Messen Sie die Fallhöhe vom „Abwurfpunkt“ der Kugeln am Ende der Kugelbahn bis zum Fußboden.
3. Stellen Sie zwei Kugelbahnen mit aufgeklebten Haltemagneten auf den Tisch, so dass die Kugeln beim Herunterrollen kurz nach dem Verlassen der Bahnen einen Stoß durchführen.

Hinweise:

- Die Bahnenenden müssen etwa am Rand des Tisches positioniert sein und einen gegenseitigen Abstand von ca. 4 cm bis 5 cm haben. Sonst kann es passieren, dass der Stoß stattfindet, während eine der Kugeln noch in der Führungsschiene rollt, wodurch die Messwerte völlig verfälscht würden.

- Vermeiden Sie extrem große und extrem kleine Winkel.
4. Befestigen Sie ein großes Stück Zeitungspapier so auf dem Boden, dass beide Kugeln — sowohl wenn Sie sie einzeln rollen lassen als auch nach einem Stoß — auf dem Papier aufkommen. Verändern Sie gegebenenfalls die Positionen der Kugelbahnen und der Elektromagnete, um die Geschwindigkeit und Wurfweite der Kugeln entsprechend anzupassen.  
Hinweis: Achten Sie darauf, dass die Kugelbahnen nun zunächst nicht mehr verschoben werden!
  5. Markieren Sie mit Hilfe des Senklotes die Position, an der sich die Kugeln stoßen. Skizzieren Sie auf dem Papier auch die Lage, die die Kugeln dabei einnehmen, um die Positionen der Mittelpunkte der Kugeln beim Stoß zu kennen.
  6. Lassen Sie zunächst jede Kugel einzeln „fallen“. Legen Sie ein Kohlepapier ungefähr zum Auftreffpunkt, so dass dieser durch die Kugel markiert wird. Wiederholen Sie den Vorgang ein paar Mal, um die Messunsicherheit abschätzen zu können. Beschriften Sie die Markierungen dann gleich, um sie später wieder zuordnen zu können.

Hinweis: Aus diesen Werten werden später die Geschwindigkeiten der Kugeln vor dem Stoß ermittelt.

7. Lassen Sie nun beide Kugeln gleichzeitig loslaufen, so dass sie sich stoßen. Lassen Sie dabei auf die gleiche Weise beide Auftreffpunkte markieren und beschriften Sie sie entsprechend.

Wiederholen Sie auch diese Messung mehrfach.

Hinweis: Aus diesen Werten werden später die Geschwindigkeiten der Kugeln nach dem Stoß ermittelt. Beschriften Sie die Auftreffpunkte so, dass sie die einzelnen Durchgänge getrennt auswerten können. Die Reproduzierbarkeit des Stoßparameters beim Zusammenstoß der Kugeln ist nicht so gut, dass es sinnvoll wäre, über mehrere Stöße zu mitteln. Kleine Schwankungen führen dabei schon zu relativ großen Abweichungen der Auftreffpunkte. Werten Sie daher lieber Einzelereignisse aus.

8. Verändern Sie die Anordnung der Kugelbahnen, z. B. indem Sie den Stoßwinkel ändern oder durch Verschieben der Haltemagnete die Geschwindigkeiten der Kugeln ändern und wiederholen Sie die Punkte 5 bis 7 für insgesamt mindestens drei verschiedene Anordnungen.

Dabei können Sie auch Kugeln anderer Masse oder mit anderer Oberfläche (z. B. mit Gummi ummantelt) auswählen. Achten Sie aber darauf, dass Sie immer zwei gleiche Kugeln für eine Anordnung verwenden.

## Auswertung

Hinweise:

- Die Auswertung zur Impulserhaltung wird noch während des Versuchsnachmittages auf grafische Weise durchgeführt.
- Um die Überprüfung von Energie- und Impulserhaltung besonders einfach durchzuführen, verzichten Sie bitte auf die Festlegung eines Koordinatensystems. Betrachten Sie stattdessen
  - für die Energieerhaltung: die Beträge der Einzelimpulse vor und nach dem Stoß,
  - für die Impulserhaltung: den Betrag des Gesamtimpulses vor dem Stoß und den Betrag der Impulsdifferenz zwischen dem vor und nach dem Stoß experimentell bestimmten Gesamtimpuls.

Diese Beträge können Sie alle leicht grafisch bestimmen, die Vorgehensweise ist unten beschrieben.<sup>1</sup> Das Ausmessen der kartesischen Koordinaten würde zu zusätzlichen Unsicherheiten führen.

1. Führen Sie die grafische Auswertung zur Impulserhaltung für jede Konfiguration folgendermaßen durch (siehe Abbildung 2.12.2 auf der nächsten Seite):<sup>2</sup>
  - a) Bestimmen Sie die Impulssumme vor dem Stoß:
    - i. Bestimmen Sie jeweils grafisch den sog. Flächenschwerpunkt der drei Auftreffpunkte bei den Würfeln einer Kugel ohne Stoß. Dieser ist gegeben durch den Schnittpunkt der Seitenhalbierenden des entsprechenden Dreiecks.
    - ii. Zeichnen Sie jeweils einen Kreis um diesen Flächenschwerpunkt, der groß genug ist, um alle drei Punkte zu enthalten.
    - iii. Bestimmen Sie die Mitte der Strecke zwischen den beiden Flächenschwerpunkten.
    - iv. Zeichnen Sie um diesen Punkt ebenfalls einen Kreis. Verwenden Sie dabei als Durchmesser den Durchmesser des größeren Kreises aus 1(a)ii.
  - b) Bestimmen Sie für alle fünf Stöße jeweils die Impulssumme nach dem Stoß:
    - i. Bestimmen Sie die Mitte der Strecke zwischen den Auftreffpunkten der beiden Kugeln.
    - ii. Zeichnen Sie um diesen Punkt ebenfalls einen Kreis. Verwenden Sie dabei wieder den gleichen Durchmesser wie in 1(a)iv.
  - c) Prüfen Sie, wie Ihre Ergebnisse mit der Gültigkeit des Impulserhaltungssatzes zusammenpassen, indem Sie die gegenseitige Überlappung der „Unsicherheitskreise“ betrachten.

<sup>1</sup>Wenn die Kugeln sich in der Masse unterscheiden würden, müssten Sie dabei darauf achten, das Massenverhältnis in die Konstruktion mit einzubeziehen, was die zeichnerische Auswertung leider etwas komplizierter machen würde.

<sup>2</sup>Diese Vorgehensweise ist zwar nur näherungsweise richtig, liefert dafür aber schnell und unkompliziert eine durchaus brauchbare Aussage.

2. Führen Sie die Auswertung zur Energieerhaltung für jede Konfiguration folgendermaßen durch:
- Berechnen Sie zu allen Anordnungen jeweils aus den (mittleren) Wurfweiten der Kugeln deren Geschwindigkeiten und kinetische Energien vor und nach dem Stoß.
  - Prüfen Sie, wie Ihre Ergebnisse mit der Gültigkeit des Energieerhaltungssatzes zusammenpassen.

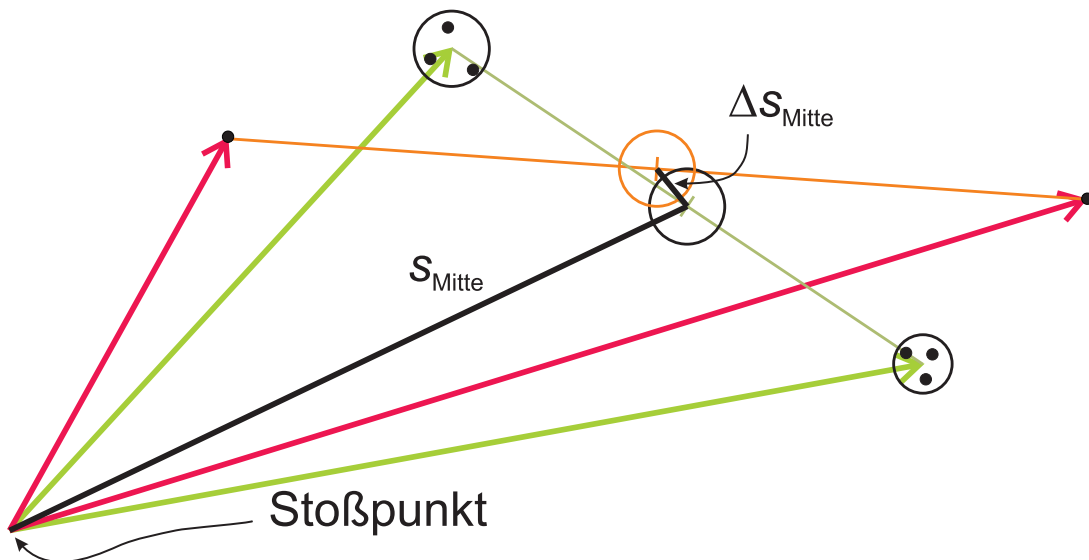


Abbildung 2.12.2.: Prinzipskizze zur grafischen Auswertung der Impulserhaltung beim Versuch „Stoßgesetze in zwei Dimensionen“.

## Fragen und Aufgaben

- Warum würde man nicht die richtige Fluggeschwindigkeit der Kugeln vor dem Stoß erhalten, wenn man versuchen würde, nach dem Energieerhaltungssatz die Lageenergie der Kugeln an den Elektromagneten in kinetische Energie der Translationsbewegung am Ende der Bahn umzurechnen?

Wie müsste man stattdessen rechnen?

Hinweis: Es tritt noch eine weitere Bewegungsenergie auf.

## Literaturhinweise

Die Idee zur Verwendung zykloidenförmiger Bahnen wurde aus [Myu01] übernommen. Diese Veröffentlichung stellt auch einen guten Einstieg in das Experiment dar.

## Literaturverzeichnis

- [Myu01] MYUNG-HYUN HA AND YANG-KIE SIM AND SANG BUB LEE: *Development of an apparatus for two-dimensional collision experiment using a cycloidal slide.* Am. J. Phys., 69(11):1187–1190, November 2001.

Messwerttabelle und Auswertung zum Experiment „Stoßgesetze“

	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Fallhöhe <math>h</math> in m</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">0</td> </tr> </table>	Fallhöhe $h$ in m	0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Erdbeschleunigung <math>g</math> in <math>m/s^2</math></td> <td style="width: 50%; text-align: center;">0</td> </tr> </table>	Erdbeschleunigung $g$ in $m/s^2$	0			
Fallhöhe $h$ in m	0								
Erdbeschleunigung $g$ in $m/s^2$	0								
Konfiguration 1	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Kugelmassen <math>m_1</math> in kg <math>m_2</math> in kg</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Mittelwert von jeweils 3 Würfeln</td> </tr> </table>	Kugelmassen $m_1$ in kg $m_2$ in kg	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">ohne Stoß</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Mittelwert von jeweils 3 Würfeln</td> </tr> </table>	ohne Stoß	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Kugelmassen $m_1$ in kg $m_2$ in kg	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln								
ohne Stoß	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln								
Stoß 1	Stoß 5								
Konfiguration 2	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Kugelmassen <math>m_1</math> in kg <math>m_2</math> in kg</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Mittelwert von jeweils 3 Würfeln</td> </tr> </table>	Kugelmassen $m_1$ in kg $m_2$ in kg	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">ohne Stoß</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Mittelwert von jeweils 3 Würfeln</td> </tr> </table>	ohne Stoß	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Kugelmassen $m_1$ in kg $m_2$ in kg	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln								
ohne Stoß	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln								
Stoß 1	Stoß 5								
Konfiguration 3	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Kugelmassen <math>m_1</math> in kg <math>m_2</math> in kg</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Mittelwert von jeweils 3 Würfeln</td> </tr> </table>	Kugelmassen $m_1$ in kg $m_2$ in kg	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">ohne Stoß</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Mittelwert von jeweils 3 Würfeln</td> </tr> </table>	ohne Stoß	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Kugelmassen $m_1$ in kg $m_2$ in kg	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln								
ohne Stoß	Mittelwert von jeweils 3 Würfeln								
Stoß 1	Stoß 5								

	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Stoß 1	Stoß 5		
Energieerhaltung	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Stoß 1	Stoß 5		
Impulserhaltung	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Stoß 1	Stoß 5		

	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Stoß 1	Stoß 5		
Energieerhaltung	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Stoß 1	Stoß 5		
Impulserhaltung	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Stoß 1	Stoß 5		

	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Stoß 1	Stoß 5		
Energieerhaltung	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Stoß 1	Stoß 5		
Impulserhaltung	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Stoß 1</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Stoß 5</td> </tr> </table>	Stoß 1	Stoß 5
Stoß 1	Stoß 5		

Hinweis: Die Unsicherheiten  $u(h)$  und  $u(g)$  werden als vernachlässigbar behandelt

Hinweis: Der Einfachheit halber nehmen wir zunächst an, dass alle Massen mit der gleichen absoluten Unsicherheit gemessen werden. Die entsprechenden Zellen können aber auch mit anderen Werten überschrieben werden.

Hinweis: Der Einfachheit halber nehmen wir zunächst an, dass alle Strecken mit der gleichen absoluten Unsicherheit gemessen werden. Die entsprechenden Zellen können aber auch mit anderen Werten überschrieben werden.

Abbildung 2.12.3.: Messwerttabelle zum Versuch „Stoßgesetze in zwei Dimensionen“.