

Durch Erzeugung elastischer bzw. unelastischer mechanischer Stöße zweier Gleiter auf einer Luftkissenbahn sollen die Energie- und die Impulserhaltung experimentell untersucht werden.

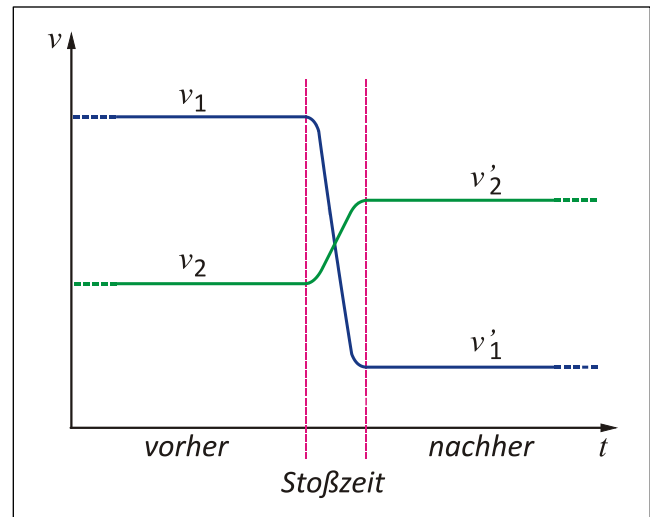
### 1. Theoretische Grundlagen

Bei einem Stoßprozess berühren sich zwei (oder auch mehrere) Körper kurzzeitig unter Änderung ihres jeweiligen Bewegungszustands (**Bild 1** mit  $v_1$ ,  $v'_1$  bzw.  $v_2$ ,  $v'_2$ , Geschwindigkeiten vor bzw. nach dem Stoß des Körpers 1 mit dem Körper 2). Kennzeichnend ist die Einmaligkeit und die im Vergleich zur gesamten Beobachtungsdauer kurze Kontaktzeit der beteiligten Körper. In dieser Wechselwirkungszeit treten verhältnismäßig große Kräfte auf, welche die Bewegung wenigstens einer der beteiligten Körper abrupt ändert.

Stoß-Beispiele sind Billard-, Tennis- oder Fußballstöße sowie Auto-Unfallversuche.

Stoßprozesse treten auch bei atomaren Vorgängen auf. Bei Zusammenstößen zwischen Atomen und Molekülen treten an die Stelle der elastischen Kräfte der Mechanik elektrostatische Wechselwirkungskräfte.

Eine Klassifikation der Stöße zwischen makroskopischen Körpern lässt sich nach den Änderungen der kinetischen Energie der Stoßpartner treffen. **Bild 2** zeigt eine Übersicht



**Bild 1:** Zeitlicher Verlauf des Stoßes zweier elastischer Körper

|                      |  |                                                                                                                      |
|----------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gerade Stoßart       |  | Die Bahnen beider Schwerpunkte liegen auf einer Geraden.                                                             |
| Schiefe Stoßart      |  | Die Bahnen beider Schwerpunkte liegen in einer Ebene und schließen einen Winkel ein.                                 |
| Zentrale Stoßart     |  | Die Schwerpunkte der Stoßpartner liegen auf der Normalen zur Berührungsebene durch den Berührungspunkt (Stoßnormale) |
| Exzentrische Stoßart |  | Die Schwerpunkte liegen <b>nicht</b> auf der Stoßnormale. Es tritt Rotation auf.                                     |
| Elastische Stoßart   |  | Die Summen der kinetischen Energien vor und nach dem Stoß sind gleich.                                               |
| Inelastische Stoßart |  | Die Summen der kinetischen Energien vor und nach dem Stoß sind verschieden.                                          |
| Unelastische Stoßart |  | Die Körper bewegen sich nach dem Stoß mit gleicher Endgeschwindigkeit gemeinsam weiter.                              |

**Bild 2:** Klassifikation der Stoßprozesse

### 1.1 Gerader, zentraler, elastischer Stoß

Für ein Zeitintervall kurz vor und kurz nach dem Stoß sind die Änderungen der potentiellen Energien der Stoßpartner und die Reibungsverluste vernachlässigbar gegenüber den kinetischen Energien; für den Stoßzeitraum ist das System abgeschlossen und ohne Einwirkung äußerer Kräfte. Zwischen den Geschwindigkeiten der Stoßpartner vor dem Stoß  $\vec{v}_1$  sowie  $\vec{v}_2$  und nach dem Stoß  $\vec{u}_1$  sowie  $\vec{u}_2$  besteht nach dem Impulserhaltungssatz der Zusammenhang

$$m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 = m_1 \cdot \vec{v}'_1 + m_2 \cdot \vec{v}'_2 \quad (1a)$$

Die Vektoren können algebraisch addiert werden, weil der gerade zentrale Stoß eindimensional ist:

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v'_1 + m_2 \cdot v'_2 \quad (1b)$$

Die zweite Bestimmungsgleichung ist der Energieerhaltungssatz:

$$\frac{1}{2}m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 \cdot v_2^2 = \frac{1}{2}m_1 \cdot v'^2_1 + \frac{1}{2}m_2 \cdot v'^2_2 \quad (2a)$$

Durch Umformung von Gleichung (2a) ergibt sich

$$m_1 \cdot (v_1 + v'_1) \cdot (v_1 - v'_1) = m_2 \cdot (v_2 + v'_2) \cdot (v_2 - v'_2) \quad (2b)$$

und nach einsetzen von Gleichung (1b)

$$v_1 - v_2 = -(v'_1 - v'_2) \quad (3)$$

Vom Körper 2 aus gesehen, bewegt sich der Körper 1 nach dem Stoß mit derselben Relativgeschwindigkeit weg, mit der er vor dem Stoß auf den Körper 2 zugeht.

Setzt man Gleichung (3) in Gleichung (1b) ein, so führt dies auf die Bestimmungsgleichungen für die Geschwindigkeiten nach dem Stoß:

$$v'_1 = \frac{(m_1 - m_2) \cdot v_1 + 2m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} \quad (4)$$

$$= \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} - \frac{m_2 \cdot (v_1 - v_2)}{m_1 + m_2}$$

$$v'_2 = \frac{2m_1 \cdot v_1 + (m_2 - m_1) \cdot v_2}{m_1 + m_2} \quad (5)$$

$$= \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} + \frac{m_1 \cdot (v_1 - v_2)}{m_1 + m_2}$$

Aus Gleichung (5) geht hervor, dass der Körper 2 an Geschwindigkeit gewinnt und der Körper 1 Geschwindigkeit verliert, wie dies auch aus **Bild 1** zu folgern ist.

## 1.2 Gerader, zentraler, inelastischer Stoß

Geht beim Stoßvorgang kinetische Energie beispielsweise durch Reibung- oder inelastische Verformungsarbeit verloren, dann muss der allgemeine Energiesatz zur Berechnung der Geschwindigkeiten nach dem Stoß herangezogen und der Energieverlust  $\Delta E$  berücksichtigt werden:

$$\frac{1}{2}m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 \cdot v_2^2 = \frac{1}{2}m_1 \cdot v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2 \cdot v_2'^2 + \Delta E. \quad (6)$$

Zusätzlich zum Impulserhaltungssatz nach Gleichung (1) ist eine weitere Bestimmungsgleichung notwendig, um die Geschwindigkeiten  $\vec{v}_1'$  und  $\vec{v}_2'$  nach dem Stoß und den Energieverlust  $\Delta E$  berechnen zu können.

Ein spezieller inelastischer Stoßprozess ist der **unelastische Stoß**, bei dem die beiden Körper miteinander verkoppelt werden und sich nach dem Stoß mit der gemeinsamen Geschwindigkeit

$$v' = v_1' = v_2' \quad (7)$$

bewegen.

Der Impulserhaltungssatz des unelastischen Stoßes lautet  $m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2) \cdot v'$  und daraus folgt:

$$v' = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} \quad (8)$$

Wird Gleichung (8) in Gleichung (6) eingesetzt, ergibt sich der Energieverlust  $\Delta E$  beim unelastischen Stoß zu

$$E_{\text{unelast.}} = \frac{m_1 \cdot m_2}{2(m_1 + m_2)} \cdot (v_1 - v_2)^2. \quad (9)$$

Wird ein ruhender Körper gleicher Masse ( $m_1 = m_2$ ) unelastisch gestoßen, so geht nach Gleichung (9) genau die Hälfte der kinetischen Energie als Verformungsarbeit verloren.

## 1.3 Messprinzip

Für die Bearbeitung der gestellten Messaufgaben werden zwei Gleiter verwendet, die sich nahezu reibungsfrei auf der Luftkissenfahrbahn bewegen können. Die Registrierung der Bewegungen erfolgt durch Zeitmessungen zweier Lichtschranken. Es werden dazu die Durchgangszeiten der Markierungsfahnen erfasst, die auf die Gleiter aufgesteckt sind. Die gemessenen Zeiten werden dann über das PC-Messsystem CassyLab ausgewertet und Geschwindigkeiten, Impulse sowie kinetische Energien der Gleiter berechnet und tabellarisch ausgegeben.

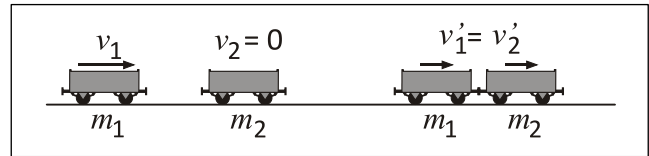
## 2. Versuch

### 2.1 Vorbetrachtung

**Aufgabe 1:** Beide Gleiter der Luftkissenbahn (*Versuch M04*) fahren zur selben Zeit los und bewegen sich mit einer gleichförmigen Bewegung aber unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf einander zu. Leiten Sie aus diesem Zusammenhang die Gleichung für die Berechnung der Stoßereigniszeit  $t_E$  her.

**Aufgabe 2:** Ein Güterwagen mit einer Masse  $m_1$  fährt mit der Geschwindigkeit  $v_1$  auf einen anderen ruhenden Güterwagen mit einer Masse  $m_2$  auf und kuppelt dabei so an, dass beide Wagen mit gleicher Geschwindigkeit weiterfahren. ( $m_1=16\text{ t}$ ,  $m_2=20\text{ t}$ ,  $v_1=18\text{ km/h}$ ,  $v_2=0$ )

Um welchen Betrag hat sich die kinetische Energie beider Wagen geändert?



**Bild 3:** vor dem Stoß - nach dem Stoß

## 2.2 Versuchsdurchführung

### 2.2.1 Verwendete Geräte

Luftkissenbahn mit Gebläse, 2 Gleiter mit Fahnen (5cm), 2 Zusatzgewichte, 2 aufsteckbare Prallmagnete, 2 aufsteckbare Rundfederpuffer, 2 aufsteckbare Klettbandpuffer, 2 Lichtschranken, Haltemagnete mit Stativsystem, Umpolungsbox, Sensor-Cassy2, PC und Software „Cassy“, 3 Labornetzteile.

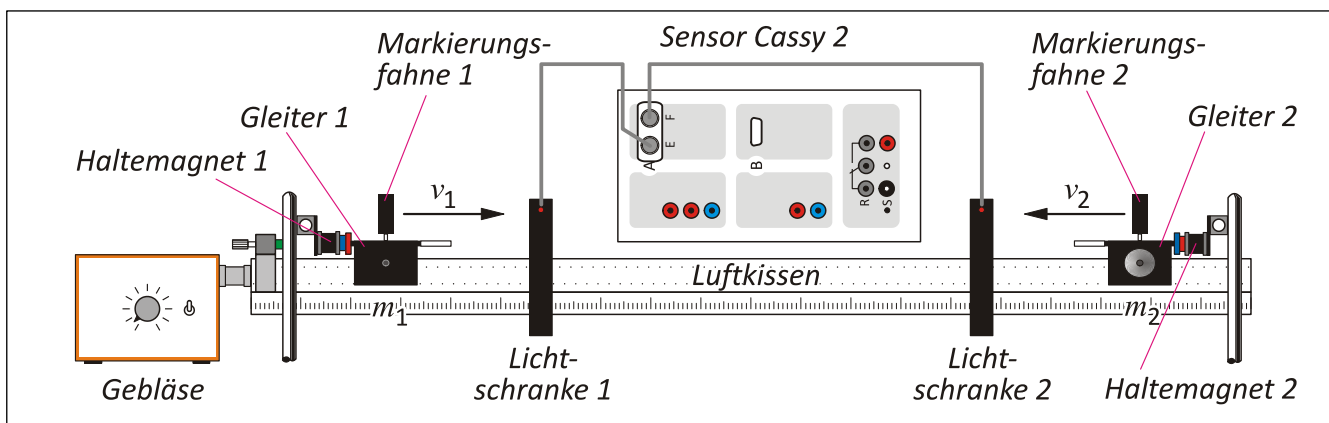
### 2.2.2 Versuchshinweise

#### Justierung der Fahrbahn

- Überprüfen Sie die Justierung der Fahrbahn (*ob waagerecht*) und machen Sie sich mit der Messanordnung vertraut.

Die Einstellung der Horizontalen der Fahrbahn erfolgt mit den Justierschrauben am Fahrbahngestell. Diese Justierung ist dann abgeschlossen, wenn der Gleiter bei eingeschaltetem Gebläse (**Stufe 2**) sich nicht mehr allein von der Mitte weg in Bewegung setzt. (*Die erreichbare Messgenauigkeit hängt stark von dieser Justierung ab.*)

Die optimale Luftfördermenge hängt stark von der Masse des verwendeten Gleiters ab. Sie kann am Gebläse variiert werden. Beachten Sie, je größer die Gleitmasse ist, umso größer muss der Volumenstrom des Gebläses gewählt werden.



**Bild 4:** Versuchsaufbau

#### Hinweis:

Die Bedienungsanleitung des PC-Messsystems befindet sich am Praktikumsplatz.

**Aufgabe 1:** Untersuchungen zum zentralen, elastischen Stoß

**Hinweis:** Für  $v_2 = 0$  bzw.  $U_2 = 0$  ist der Gleiter 2 beim Start in Mittelposition (zwischen den Lichtschranken bei ca. 100 cm) zu halten.

- Untersuchen Sie folgende Stoßvarianten:

- a)  $m_1 = m_2 ; v_1 = v_2 \neq 0$  ( $U_1 = U_2 = 16 \text{ V}$ )
- b)  $m_1 < m_2 ; v_1 = v_2 \neq 0$  ( $U_1 = U_2 = 16 \text{ V}$ ;  $m_2$  mit Zusatzgewichten)
- c)  $m_1 = m_2 ; v_1 \neq 0 ; v_2 = 0$  ( $U_1 = 16 \text{ V}$ ;  $U_2 = 0$ )
- d)  $m_1 < m_2 ; v_1 \neq 0 ; v_2 = 0$  ( $U_1 = 16 \text{ V}$ ;  $U_2 = 0$ ;  $m_2$  mit Zusatzgewichten)

- Überprüfen Sie folgendes:

- ob **Lichtschranke 1 bei ca. 70 cm** bzw. **Lichtschranke 2 bei ca. 130 cm** befestigen ist (resultierende Messstrecke beträgt 60 cm),
- ob die Kabel zwischen den Lichtschranken und der Cassy-Anschluss-Box verbunden sind, (**Eingang E von Lichtschranke 1, Eingang F von Lichtschranke 2**),
- ob die Umpolungsbox korrekt mit den Haltemagneten und den Netzteilen verbunden ist
- ob auf jeden der beiden Gleiter die Fahnen (*oben*), die zwei Rundfedern (*Stoßseite*) und die zwei Magnetprallplatten (*abgewandte Stoßseite*) befestigt sind,
- ob der Gebläseregler auf **Stellung 2** steht (für gesamten Versuch konstant halten).

- Stellen Sie an den Netzteilen folgende Spannungen ein:

- Netzteil Betriebsspannung „Umpolungsbox“  **$U=10 \text{ V}$** ,
- Netzteil Betriebsspannung „Haltemagnete“  **$U=16 \text{ V}$** .

- Ermitteln Sie die genaue Position der Gleiter ( $x_{G1}, x_{G2}$ ) bzw. der Lichtschranken ( $x_{L1}, x_{L2}$ ).

- Bestimmen Sie die Masse der beiden Gleiter (komplett mit Fahne und Rundfederpuffer) und der Zusatzgewichte.

- Führen Sie **je dreimal** die Messung nach den Vorgaben der Stoßvarianten durch.

- Notieren Sie sich die im Messprogramm angezeigten Geschwindigkeiten ( $v_1, v_2, v_1', v_2'$ ).

**Aufgabe 2:** Untersuchungen zum zentralen, unelastischen Stoß

- Nehmen Sie die Rundfederpuffer von den Gleitern ab und ersetzen Sie diese durch die Klettbandpuffer.

- Untersuchen Sie folgende Stoßvarianten analog **zur Aufgabe 1**:

- a)  $m_1 = m_2 ; v_1 = v_2 \neq 0$  ( $U_1 = U_2 = 30 \text{ V}$ )
- b)  $m_1 < m_2 ; v_1 = v_2 \neq 0$  ( $U_1 = U_2 = 30 \text{ V}$ ;  $m_2$  mit Zusatzgewichten)
- c)  $m_1 = m_2 ; v_1 \neq 0 ; v_2 = 0$  ( $U_1 = 30 \text{ V}$ ;  $U_2 = 0$ )
- d)  $m_1 < m_2 ; v_1 \neq 0 ; v_2 = 0$  ( $U_1 = 30 \text{ V}$ ;  $U_2 = 0$ ;  $m_2$  mit Zusatzgewichten)
- e)  $m_1 > m_2 ; v_1 \neq 0 ; v_2 = 0$  ( $U_1 = 30 \text{ V}$ ;  $U_2 = 0$ ;  $m_1$  mit Zusatzgewichten)

## 2.3 Versuchsauswertung

**Aufgabe 1 und 2:** Untersuchungen aller 4 Fälle zum zentralen, elastischen bzw. unelastischen Stoß

- Bestimmen Sie tabellarisch die mittleren Geschwindigkeiten ( $v_1, v_2, v_1', v_2'$ ) und die Messunsicherheit durch Fehlerrechnungen aus der Summe des systematischen und des zufälligen Fehlers (*Mittelwert, Standardabweichung, t-Verteilung*).
- Berechnen Sie tabellarisch die Einzelimpulse ( $p_1, p_2, p_1', p_2'$ ) sowie die Gesamtimpulse ( $p_{ges}, p_{ges}'$ ).
- Ermitteln Sie tabellarisch die Einzelenergien ( $E_1, E_2, E_1', E_2'$ ), die Gesamtenergie ( $E_{ges}, E_{ges}'$ ) und die Energiebilanzen ( $\Delta E/E$ ).
- Skizzieren Sie die Messanordnung nach **Bild 4** und zeichnen Sie alle relevanten Größen ein.
- Berechnen Sie die Stoßereigniszeiten  $t_E$  nach dem Auslösen der Gleiter und die Gesamtmesszeit  $t_{1(ges)}$  und  $t_{2(ges)}$  für beide Gleiter (*Gesamtmesszeit: Zeitspanne zwischen Messauslösung und dem zweites Mal passieren der Lichtschranke*).
- Bestimmen Sie für je einen Fall (**Aufgabe 1 und 2**) Sie Abweichungen durch eine Fehlerrechnung unter Berücksichtigung auftretender Messabweichungen und diskutieren Sie die Ergebnisse.
- Stellen Sie tabellarisch für alle Messwerte (**Aufgabe 1 und 2**) bei  $v_2 = 0$  die Energieabnahme ( $\Delta E/E$ ) zum Massenverhältnis ( $m_1/m_2$ ) gegenüber. Und diskutieren Sie das Ergebnis.
- Stellen Sie die Funktion  $v = f(t)$  für den Fall 1a und 2a in je einem Diagramm graphisch dar und zeichnen die wichtigsten Eckdaten (*Durchquerungszeit der Lichtschranken bzw. Ereigniszeit  $t_E$* ) mit ein. Diskutieren Sie die Ergebnisse.

## 3. Ergänzungen

In der Atom- und Kernphysik werden Stoßvorgänge als Streuung bezeichnet. Ein großer Teil der Erkenntnisse über den Aufbau mikroskopischer Strukturen (*Atomkern und -hülle, Moleküle, Festkörper*) stammt aus Streuversuchen. So lassen sich aus der Winkel- und Energieverteilung der gestreuten Teilchen quantitative Aussagen über die Wechselwirkungen ableiten.