

I. Physikalisches Institut  
Universität zu Köln

# M5: Stoßgesetze



## PRAKTIKUM A FÜR NEBENFÄCHLER

Version vom 7. Juni 2023

Abzugeben bis: \_\_\_\_\_

Assistent: \_\_\_\_\_

Gruppenmitglieder: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Vorbereitung (zu Hause)</b>	<b>2</b>
2.1	Basiswissen . . . . .	2
2.1.1	Impuls . . . . .	2
2.1.2	Drehimpuls . . . . .	2
2.1.3	Translationsenergie . . . . .	3
2.1.4	Rotationsenergie . . . . .	3
2.1.5	kinetische Energie . . . . .	3
2.1.6	Trägheitsmoment . . . . .	4
2.1.7	Gaußsche Fehlerfortpflanzung . . . . .	4
2.1.8	Newton'sche Axiome . . . . .	5
2.1.9	Satz von Steiner . . . . .	5
2.1.10	Erhaltungssätze der Mechanik . . . . .	6
2.2	Vollkommen elastischer Stoß . . . . .	6
2.2.1	Welche Größen bleiben erhalten? . . . . .	6
2.2.2	Stoßwinkel . . . . .	7
2.3	Vollkommen inelastischer Stoß . . . . .	7
2.3.1	Welche Größen bleiben erhalten? . . . . .	7
2.3.2	Was geschieht mit dem Fehlbetrag der nicht erhaltenen Größe? . . . . .	7
2.4	Versuchsbeschreibung . . . . .	7
2.4.1	In Versuchsteil 6.2.1 soll... . . . . .	7
2.4.2	In Versuchsteil 6.2.2 soll... . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau und -beschreibung</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Benötigte Formeln</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Sicherheitshinweise</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Durchführung (im Praktikum)</b>	<b>14</b>
6.1	Eingewöhnung . . . . .	14
6.2	Messung . . . . .	14
6.2.1	Vollkommen elastischer Stoß: . . . . .	14
6.2.2	Vollkommen inelastischer Stoß: . . . . .	15
<b>7</b>	<b>Auswertung und Diskussion (zu Hause)</b>	<b>16</b>
7.1	Vollkommen elastischer Stoß . . . . .	16
7.1.1	Parametrisierung . . . . .	16
7.1.2	Impulserhaltung . . . . .	17
7.1.3	Energieerhaltung . . . . .	24

7.2	Vollkommen inelastischer Stoß: . . . . .	27
7.2.1	Drehimpuls vor dem Stoß . . . . .	27
7.2.2	Drehimpuls nach dem Stoß . . . . .	28
<b>8</b>	<b>Anhang: Hinweise zur Herleitung der Formeln</b>	<b>32</b>
8.1	Stoßwinkel beim vollkommen elastischen Stoß . . . . .	32
8.2	Drehimpuls vor dem Stoß . . . . .	32
8.3	Trägheitsmoment . . . . .	33
8.4	Wechsel vom Labor- ins Schwerpunktsystem . . . . .	33
<b>9</b>	<b>Literatur</b>	<b>35</b>

# 1 Einleitung

In diesem Versuch sollen Sie sich mit den verschiedenen Formen von Stößen vertraut machen. Dabei überprüfen Sie auch die drei wichtigsten Erhaltungssätze der Mechanik: Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltung. Stöße spielen nicht nur in der Physik (zum Beispiel in der Kernphysik) sondern auch in der Technik (Knautschzone am Auto, Leitplanken) und anderen Naturwissenschaften eine große Rolle. In der Chemie beispielsweise kann von den Stoßbedingungen, vor allem von der kinetischen Energie sehr stark abhängen, ob eine Reaktion abläuft.

## Wichtige Informationen

Zur Bearbeitung ist es zwingend erforderlich dass Sie sich mit den Grundlagen der Fehlerrechnung (Gaußsche Fehlerfortpflanzung, (Gewichteter) Fehler des Mittelwerts, Grafische Geradenanpassung) vertraut machen.

Der Umfang dieses Versuchs macht es nötig, dass sie der Ordnung halber die Blätter mittels Schnellhefter o.ä. binden. Bitte lochen Sie die Blätter und heften Sie sie sorgfältig ein. Sollte die Form der Abgabe nicht den Regularien entsprechen wird die Auswertung durch den Assistenten verweigert werden.

Versuchen Sie innerhalb der vorgegebenen Lücken zu bleiben, diese geben den Umfang vor, der an entsprechender Stelle erwartet wird. Sollte der Platz dennoch nicht ausreichen fügen Sie ganze Blätter ein.

Beachten Sie bitte, dass die Lücken und Fragestellungen in den Abschnitten 2 und 6 vollständig zu beantworten sind und am Versuchstag vorgezeigt werden müssen. Es wird davon ausgegangen, dass alle Gruppenmitglieder die vollständige Anleitung durchgelesen und verstanden haben. Sollten Sie am Versuchstag nicht ausreichend auf den Versuch vorbereitet sein, wird die Assistentin/der Assistent Sie nicht am Versuch teilnehmen lassen.

Alle auf dem Deckblatt aufgeführten Gruppenmitglieder sind für die Bearbeitung und fristgerechte Abgabe des Versuchsberichts bzw. dessen erforderlichen Korrekturen zuständig und verantwortlich. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass Sie sich mit den Regeln des A-Praktikums<sup>a</sup> vertraut gemacht haben.

<sup>a</sup>zu finden unter: <https://astro.uni-koeln.de/AP>

## 2 Vorbereitung (zu Hause)

Die folgenden Stichpunkte und theoretischen Überlegungen sollen schriftlich bearbeitet werden. Außerdem sollten Sie in der Lage sein, sie am Versuchstag im Antestat selbstständig wiederzugeben. Weitere Hinweise zum Vorgehen bei den Herleitungen finden Sie in Abschnitt 8. Literaturhinweise gibt es in Abschnitt 9.

Machen Sie sich mit folgenden Begriffen und Gesetzmäßigkeiten vertraut:

### 2.1 Basiswissen

#### 2.1.1 Impuls

Der Impuls eines Massenpunkts  $m_i$  ist definiert über  $\mathbf{p}_i = m_i \mathbf{v}_i$ , wobei  $\mathbf{v}_i$  dessen \_\_\_\_\_ ist.

Der Gesamtimpuls eines Teilchensystems ist \_\_\_\_\_ der Einzelimpulse  $\mathbf{p}_i$  ist, es gilt also:  $\mathbf{p} = \sum_i \mathbf{p}_i$ . Die Einheit des Impulses ist \_\_\_\_\_.

Um den Impuls zu ändern muss man \_\_\_\_\_ aufwenden. Es gilt also  $\dot{\mathbf{p}} =$  \_\_\_\_\_.

#### 2.1.2 Drehimpuls

Ein Drehimpuls kann für einen Massenpunkt mit Impuls  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$  bezüglich eines beliebigen Referenzpunkts definiert werden. Ist der Radius bzgl. dieses Referenzpunkts  $\mathbf{r}$ , so definiert man den Drehimpuls

$$\mathbf{L} = \text{_____} = r p \sin(\angle(r, p)) \mathbf{e}_{r \perp p} \quad (2.1)$$

Wobei  $\mathbf{e}_{r \perp p}$  der Einheitsvektor ist, der rechtwinklig auf  $\mathbf{r}$  und  $\mathbf{p}$  steht. Er lässt sich mit dem Trägheitsmoment  $I$  und Winkel  $\phi$  ausserdem schreiben als

$$\mathbf{L} = \text{_____}. \quad (2.2)$$

Wobei die zeitliche Ableitung  $\frac{d\phi}{dt} = \dot{\phi} = \omega$  als \_\_\_\_\_  
bezeichnet wird.

### 2.1.3 Translationsenergie

Die Translationsenergie ist ... \_\_\_\_\_

Formel:

$$E_{\text{trans}} = \underline{\hspace{10em}}$$

### 2.1.4 Rotationsenergie

Die Rotationsenergie ist ... \_\_\_\_\_

Formel:

$$E_{\text{rot}} = \underline{\hspace{10em}}$$

### 2.1.5 kinetische Energie

Die kinetische Energie ist ... \_\_\_\_\_

Formel:

$$E_{\text{kin}} = \underline{\hspace{10em}}$$

## 2.1.6 Trägheitsmoment

Das Trägheitsmoment  $I$  ist der \_\_\_\_\_ eines Systems entgegen einer Drehung bzgl. einer Drehachse. Allgemein wird es berechnet als:

$$I = \underline{\hspace{10cm}}$$

und speziell lautet die Formel für das Trägheitsmoment eines Vollzylinders:

$$I_{\text{Vollzylinder}} = \underline{\hspace{10cm}}$$

## 2.1.7 Gaußsche Fehlerfortpflanzung

Funktionen die auf Unsicherheitsbehafteten Werten basieren, bedürfen einer Fehlerrechnung. Diese Fehlerfortpflanzung ist also für jeden Wert, der aus Messdaten ermittelt wird anzufertigen und der Fehler anzugeben.

Ihre allgemeine Formel lautet:

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

Hier berechnen wir nun exemplarisch den Fehler für die Gleichung

$$s = vt + d = \underline{\hspace{10cm}}$$

wobei  $v = (20 \pm 2) \text{ m/s}$ ,  $d = (1,6 \pm 0,1) \text{ m}$  und  $t = (5 \pm 0,1) \text{ s}$ . Zunächst werden die Ableitungen berechnet:

$$\frac{\partial s}{\partial v} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\frac{\partial s}{\partial d} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Die Fehlerformel lautet somit:

$$\Delta s = \underline{\hspace{10cm}} = \underline{\hspace{10cm}}$$

## 2.1.8 Newton'sche Axiome

### 1. Axiom

In einem Inertialsystem bewegt sich ein Körper so lange mit konstanter \_\_\_\_\_  $\mathbf{v}$ , oder verharrt in Ruhe ( $\mathbf{v} = 0$ ), bis eine \_\_\_\_\_ auf ihn wirkt.

### 2. Axiom

In einem Inertialsystem ist die Summe aller Kräfte  $\mathbf{F}_i$  auf ein Objekt gleich  $\sum_i \mathbf{F}_i = \mathbf{F} = \text{_____}$ , wobei  $m$  dessen Masse und  $\mathbf{a}$  die \_\_\_\_\_ ist, sie ist die momentane Änderung der \_\_\_\_\_  $\mathbf{v}$  ( $\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{a}$ ).

### 3. Axiom

Wenn ein Körper A eine Kraft  $\mathbf{F}_A$  auf einen zweiten Körper B ausübt, übt Körper B gleichzeitig eine \_\_\_\_\_ gleicher Größe und entgegengesetzter Richtung auf den Körper A aus, somit ist  $\mathbf{F}_B = \text{_____}$ .

## 2.1.9 Satz von Steiner

Was besagt der Satz von Steiner?

---

---

---

Formel:

$$I = \text{_____}$$

Skizze:



### 2.1.10 Erhaltungssätze der Mechanik

Eine physikalische Größe nennt man erhalten, wenn: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Bei diesem Versuch ist zum Beispiel erhalten: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Sei  $\mathbf{X}$  eine Erhaltungsgröße, so ist deren zeitliche Ableitung  $\dot{\mathbf{X}} = \text{_____}$  .

## 2.2 Vollkommen elastischer Stoß

### 2.2.1 Welche Größen bleiben erhalten?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 2.2.2 Stoßwinkel

Sehen sie sich die Herleitung des Stoßwinkels an (Abschnitt 8.1). Gehen Sie dabei davon aus, dass die beiden stoßenden Pucks die gleiche Masse haben und Puck 2 vor dem Stoß in Ruhe ist. Gesetzt, alle Randbedingungen sind erfüllt, was erwartet man also für den Stoßwinkel der beiden Pucks?

---

Diese Erwartung lässt sich direkt beim Versuch überprüfen und der Versuch ggf. auch einige Male wiederholen sollten die Randbedingungen nicht erfüllt worden sein.

## 2.3 Vollkommen inelastischer Stoß

### 2.3.1 Welche Größen bleiben erhalten?

---

---

### 2.3.2 Was geschieht mit dem Fehlbetrag der nicht erhaltenen Größe?

---

## 2.4 Versuchsbeschreibung

Erläutern Sie *kurz*: In den Versuchsteilen soll jeweils was genau wie gemessen werden um damit später ggf. was zu bestimmen?

### 2.4.1 In Versuchsteil 6.2.1 soll...

---

---

---

---

2.4.2 In Versuchsteil [6.2.2](#) soll...

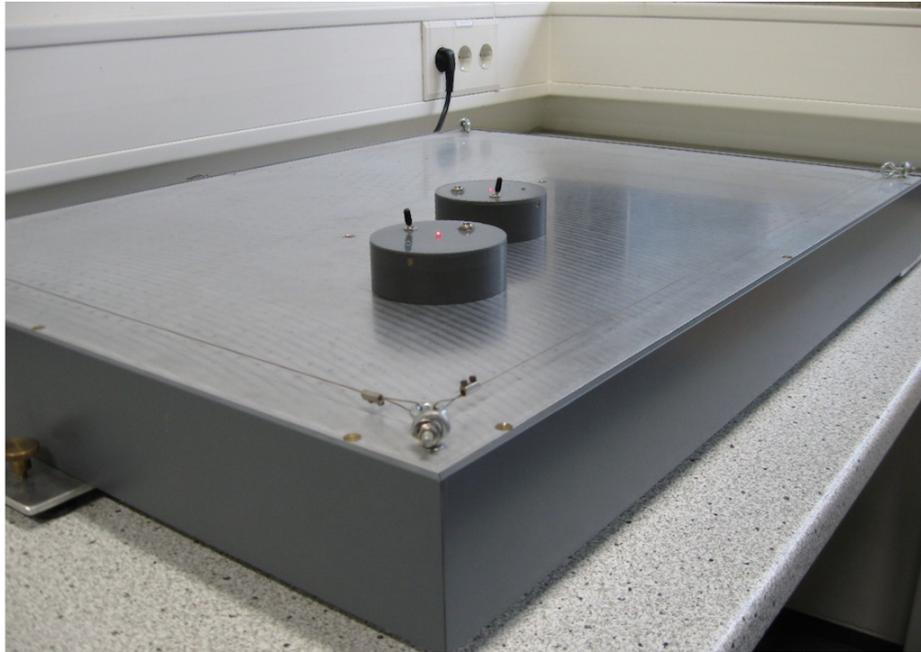
---

---

---

---

### 3 Versuchsaufbau und -beschreibung



**Abbildung 3.1:** Foto des Versuchsaufbaus

Beobachtet wird der Stoß zweier Pucks (flache Zylinder), die sich nahezu reibungsfrei auf einem Lufttisch bewegen, wie beim Airhockey. Es gibt verschiedene Arten von Pucks für die einzelnen Versuchsteile. Für die Untersuchung des vollkommen elastischen Stoßes werden magnetische Pucks verwendet, die einander abstoßen. Dies hat den Vorteil, dass der Stoß berührungsfrei stattfinden kann und so die Umwandlung von kinetischer Energie in Wärmeenergie minimiert wird. Für die Untersuchung des vollkommen inelastischen Stoßes werden Pucks verwendet, die mit Klettbandern versehen sind. So wird garantiert, dass sich die stoßenden Objekte nach dem Stoß zu einem verbunden haben und sich gemeinsam weiterbewegen.

Alle Pucks sind mit einer zentralen Leuchtdiode ausgestattet, um ihre Bewegung aufnehmen zu können. Dazu nimmt eine an den Computer angeschlossene Kamera mit einer Frequenz von 7.5 Hz eine Bilderserie der Puckbahn auf. Diese Bilder werden später von einer Software zu einem Bild überlagert. Die auf diese Weise entstandenen Trajektorien der Pucks bestehen aus Punkten, von denen jeder einen bestimmten Zeitpunkt der Bewegung markiert.

## 4 Benötigte Formeln

Hinweise zur Herleitung finden sich in Abschnitt 8 dieser Anleitung.

Die Translationsenergie jedes Pucks bestimmen Sie aus der Puckmasse  $m$  und den Impulsanteilen in  $x$ - und  $y$ -Richtung  $p_x$  bzw.  $p_y$  als

$$E_{trans} = \frac{1}{2m} (p_x^2 + p_y^2) . \quad (4.1)$$

Das Trägheitsmoment eines Pucks mit Masse  $m$  und Radius  $R$ , der um sein Zentrum mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  rotiert, ist gegeben durch

$$I_{\text{Puck}} = \frac{1}{2} m R^2 , \quad (4.2)$$

und seine Rotationsenergie ist dann

$$E_{rot} = \frac{1}{2} I_{\text{Puck}} \cdot \omega^2 . \quad (4.3)$$

Die Pucks haben aber nicht nur einen Eigendrehimpuls, der hier als Null angenommen wird, sondern das ganze System hat auch einen Gesamtdrehimpuls, obwohl es scheinbar gar keine Rotationsbewegung hat. Der Gesamtdrehimpuls addiert sich auf aus den Drehimpulsen aller beteiligter Massenpunkte bzgl. eines Referenzpunkts. Er ist im Laborsystem des ruhenden Pucks vor dem Stoß:

$$L_{\text{Puck}} = m a \frac{s}{t} , \quad (4.4)$$

wobei  $a$  der Stoßparameter ist. Wenn man sich in das Schwerpunktsystem der beiden stoßenden Pucks begibt (siehe Abschnitt 8), dann ist der Gesamtdrehimpuls vor dem Stoß

$$L_{vorher} = \frac{1}{2} \cdot m a \frac{s}{t} . \quad (4.5)$$

Denn der Drehimpuls ist anders als der Impuls vom Referenzpunkt abhängig. Für einen aussagekräftigen Vergleich müssen wir also vor und nach dem Stoß im gleichen System messen, was sich bei der Betrachtung im Schwerpunktsystem einfach realisieren lässt. Das Trägheitsmoment zweier verbundener Pucks mit jeweils Masse  $m$  und Radius  $R$ , die um den gemeinsamen Schwerpunkt rotieren, ist gegeben durch

$$I_{2\text{Pucks}} = 3mR^2 , \quad (4.6)$$

ihr Drehimpuls im Schwerpunktsystem errechnet sich als

$$L_{2\text{Pucks}} = I_{2\text{Pucks}} \cdot \omega_S , \quad (4.7)$$

wobei  $\omega_S$  die Winkelgeschwindigkeit im Schwerpunktsystem ist.

## 5 Sicherheitshinweise

Im gleichen Raum befindet sich auch der Versuchsaufbau M4 (schwarze Pucks und Stative), der Supermagnete enthält. Bitte beachten Sie die vom Hersteller empfohlenen Sicherheitsabstände in Tabelle 5.1. Der Vollständigkeit halber finden Sie in Abb. 5.1 und 5.2 auch alle übrigen Sicherheitshinweise für den Umgang mit Supermagneten. Diese sind bei ordnungsgemäßem Umgang mit dem Versuchsaufbau und Beachtung der Sicherheitsabstände jedoch nicht relevant.

Informieren Sie bei Defekten an Bestandteilen des Aufbaus Ihren Betreuer und versuchen Sie nicht selbst Teile zu demontieren.

<b>Gegenstand</b>	<b>Magnetfeld schädlich ab</b>	<b>Mindestabstand</b>
hochwertige Magnetkarte (Kreditkarte, EC-Karte, Bankkarte)	40 mT	1,5 cm
billige Magnetkarte (Parkhaus, Messeintritt)	3 mT	4,2 cm
Herzschrittmacher neu	1 mT	6,2 cm
Herzschrittmacher alt	0,5 mT	8,0 cm
Mechanische Uhr, anti-magnetisch gem ISO 746	6 mT	3,2 cm
Mechanische Uhr, nicht anti-magnetisch	0,05 mT	17,6 cm
Hörgerät	20 mT	2 cm
Fahrzeugschlüssel	keine Gefahr	
USB-Stick, Speicherkarten	keine Gefahr	
Festplatte	keine Gefahr	

**Tabelle 5.1:** Empfohlene Sicherheitsabstände für die im Versuch verwendeten Supermagnete (nach <http://www.supermagnete.de>)

## Hinweise für den sicheren Umgang mit Supermagneten

<p><b>Gefahr</b></p> 	<p><b>Verschlucken</b></p> <p>Kinder können kleine Magnete verschlucken. Wenn mehrere Magnete verschluckt werden, können diese sich im Darm festsetzen und lebensgefährliche Komplikationen verursachen.</p> <p>Magnete sind kein Spielzeug! Stellen Sie sicher, dass die Magnete nicht in die Hände von Kindern gelangen.</p>
<p><b>Gefahr</b></p> 	<p><b>Elektroleitfähigkeit</b></p> <p>Magnete sind aus Metall und leiten elektrischen Strom. Kinder können versuchen, Magnete in eine Steckdose zu stecken und dabei einen Stromschlag erleiden.</p> <p>Magnete sind kein Spielzeug! Stellen Sie sicher, dass die Magnete nicht in die Hände von Kindern gelangen.</p>
<p><b>Warnung</b></p> 	<p><b>Quetschungen</b></p> <p>Grosse Magnete haben eine sehr starke Anziehungskraft.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei unvorsichtiger Handhabung können Sie sich die Finger oder Haut zwischen zwei Magneten einklemmen. Das kann zu Quetschungen und Blutergüssen an den betroffenen Stellen führen.</li> <li>• Sehr grosse Magnete können durch ihre Kraft Knochenbrüche verursachen.</li> </ul> <p>Tragen Sie bei der Handhabung von grösseren Magneten dicke Schutzhandschuhe.</p>
<p><b>Warnung</b></p> 	<p><b>Herzschrittmacher</b></p> <p>Magnete können die Funktion von Herzschrittmachern und implantierten Defibrillatoren beeinflussen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein Herzschrittmacher kann in den Testmodus geschaltet werden und Unwohlsein verursachen.</li> <li>• Ein Defibrillator funktioniert unter Umständen nicht mehr.</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Halten Sie als Träger solcher Geräte einen genügenden Abstand zu Magneten ein: <a href="http://www.supermagnete.ch/faq/distance">www.supermagnete.ch/faq/distance</a></li> <li>• Warnen Sie Träger solcher Geräte vor der Annäherung an Magnete.</li> </ul>
<p><b>Warnung</b></p> 	<p><b>Schwere Gegenstände</b></p> <p>Zu hohe oder ruckartige Belastungen, Ermüdungserscheinungen sowie Materialfehler können dazu führen, dass sich ein Magnet oder Magnethaken von seinem Haftgrund löst. Herunterfallende Gegenstände können zu schweren Verletzungen führen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die angegebene Haftkraft wird nur unter idealen Bedingungen erreicht. Rechnen Sie einen hohen Sicherheitsfaktor ein.</li> <li>• Verwenden Sie Magnete nicht an Orten, wo bei Materialversagen Personen zu Schaden kommen können.</li> </ul>
<p><b>Warnung</b></p> 	<p><b>Metall-Splitter</b></p> <p>Magnete sind spröde. Wenn zwei Magnete kollidieren, können sie zersplintern. Scharfkantige Splitter können meterweit weg geschleudert werden und Ihre Augen verletzen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermeiden Sie Kollisionen von Magneten.</li> <li>• Tragen Sie bei der Handhabung von grösseren Magneten eine Schutzbrille.</li> <li>• Achten Sie darauf, dass umstehende Personen ebenfalls geschützt sind oder Abstand halten.</li> </ul>
<p><b>Vorsicht</b></p> 	<p><b>Magnetisches Feld</b></p> <p>Magnete erzeugen ein weit reichendes, starkes Magnetfeld. Sie können unter anderem Fernseher und Laptops, Computer-Festplatten, Kreditkarten und EC-Karten, Datenträger, mechanische Uhren, Hörgeräte und Lautsprecher beschädigen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Halten Sie Magnete von allen Geräten und Gegenständen fern, die durch starke Magnetfelder beschädigt werden können.</li> <li>• Beachten Sie unsere Tabelle mit empfohlenen Abständen: <a href="http://www.supermagnete.ch/faq/distance">www.supermagnete.ch/faq/distance</a></li> </ul>
<p><b>Vorsicht</b></p> 	<p><b>Entflammbarkeit</b></p> <p>Beim mechanischen Bearbeiten von Magneten kann sich der Bohrstaub leicht entzünden.</p> <p>Verzichten Sie auf das Bearbeiten von Magneten oder verwenden Sie geeignetes Werkzeug und genügend Kühlwasser.</p>

Abbildung 5.1: Sicherheitshinweise des Herstellers für den Umgang mit Supermagneten

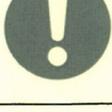
<b>Vorsicht</b> 	<p><b>Nickel-Allergie</b></p> <p>Viele unserer Magnete weisen Beschichtungen auf, die Nickel enthalten.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Manche Menschen reagieren allergisch auf den Kontakt mit Nickel.</li> <li>• Nickel-Allergien können sich bei dauerndem Kontakt mit vernickelten Gegenständen entwickeln.</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermeiden Sie dauerhaften Hautkontakt mit nickelbeschichteten Magneten.</li> <li>• Verzichten Sie auf den Umgang mit Magneten, wenn Sie bereits eine Nickelallergie haben.</li> </ul>
<b>Vorsicht</b> 	<p><b>Luftfracht</b></p> <p>Magnetfelder von nicht sachgemäss verpackten Magneten können die Navigationsgeräte von Flugzeugen beeinflussen. Im schlimmsten Fall kann dies zu einem Unfall führen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Versenden Sie Magnete nur in Verpackungen mit genügender magnetischer Abschirmung per Luftfracht.</li> <li>• Beachten Sie die einschlägigen Vorschriften: <a href="http://www.supermagnete.ch/faq/airfreight">www.supermagnete.ch/faq/airfreight</a></li> </ul>
<b>Vorsicht</b> 	<p><b>Postversand</b></p> <p>Magnetfelder von nicht sachgemäss verpackten Magneten können Störungen an Sortiergeräten verursachen und empfindliche Güter in anderen Paketen beschädigen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beachten Sie unsere Tipps für den Versand: <a href="http://www.supermagnete.ch/faq/shipping">www.supermagnete.ch/faq/shipping</a></li> <li>• Verwenden Sie eine grosszügig bemessene Schachtel und platzieren Sie die Magnete mit Hilfe von Füllmaterial in der Mitte des Paketes.</li> <li>• Ordnen Sie die Magnete in einem Paket so an, dass sich die Magnetfelder gegenseitig neutralisieren.</li> <li>• Verwenden Sie wenn nötig Eisenbleche, um das Magnetfeld abzuschirmen.</li> <li>• Für den Versand per Luftfracht gelten strengere Regeln: Beachten Sie den Warnhinweis "Luftfracht".</li> </ul>
<b>Hinweis</b> 	<p><b>Wirkung auf Menschen</b></p> <p>Magnetfelder von Dauermagneten haben nach gegenwärtigem Wissensstand keine messbare positive oder negative Auswirkung auf den Menschen. Eine gesundheitliche Gefährdung durch das Magnetfeld eines Dauermagneten ist unwahrscheinlich, kann aber nicht vollkommen ausgeschlossen werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermeiden Sie zu Ihrer Sicherheit einen dauernden Kontakt mit den Magneten.</li> <li>• Bewahren Sie grosse Magnete mindestens einen Meter von Ihrem Körper entfernt auf.</li> </ul>
<b>Hinweis</b> 	<p><b>Absplittern der Beschichtung</b></p> <p>Die meisten unserer Magnete weisen zum Schutz vor Korrosion eine dünne Nickel-Kupfer-Nickel-Beschichtung auf. Diese Beschichtung kann durch Kollisionen oder grossen Druck absplittern oder Risse erhalten. Dadurch werden die Magnete empfindlicher gegenüber Umwelteinflüssen wie Feuchtigkeit und können oxidieren.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trennen Sie grosse Magnete, insbesondere Kugeln, mit einem Stück Pappe voneinander.</li> <li>• Vermeiden Sie generell Kollisionen zwischen Magneten sowie wiederholte mechanische Belastungen (z.B. Schläge).</li> </ul>
<b>Hinweis</b> 	<p><b>Oxidation, Korrosion, Rost</b></p> <p>Unbehandelte Magnete oxidieren sehr schnell und zerfallen dabei.</p> <p>Die meisten unserer Magnete weisen zum Schutz vor Korrosion eine dünne Nickel-Kupfer-Nickel-Beschichtung auf. Diese Beschichtung bietet einen gewissen Schutz gegen Korrosion, ist aber nicht widerstandsfähig genug für den dauernden Ausseninsatz.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Setzen Sie die Magnete nur im trockenen Innenbereich ein oder schützen Sie die Magnete vor Umwelteinflüssen.</li> <li>• Vermeiden Sie Verletzungen der Beschichtung.</li> </ul>
<b>Hinweis</b> 	<p><b>Temperaturbeständigkeit</b></p> <p>Magnete haben eine begrenzte maximale Einsatztemperatur. Je nach Magnetmaterial liegt diese zwischen 80 und 220 °C. Die meisten unserer Magnete verlieren bei Temperaturen ab 80 °C dauerhaft einen Teil ihrer Haftkraft.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwenden Sie die Magnete nicht an Orten, wo sie grosser Hitze ausgesetzt sind.</li> <li>• Wenn Sie einen Kleber verwenden, härten Sie diesen nicht mittels Heissluft.</li> </ul>
<b>Hinweis</b> 	<p><b>Mechanische Bearbeitung</b></p> <p>Magnete sind spröde, hitzeempfindlich und oxidieren leicht.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beim Bohren oder Sägen eines Magneten mit ungeeignetem Werkzeug kann der Magnet zerbrechen.</li> <li>• Durch die entstehende Wärme kann der Magnet entmagnetisiert werden.</li> <li>• Wegen der beschädigten Beschichtung wird der Magnet oxidieren und zerfallen.</li> </ul> <p>Verzichten Sie auf das mechanische Bearbeiten von Magneten, wenn Sie nicht über die notwendigen Maschinen und Erfahrung verfügen. Lassen Sie sich stattdessen ein Angebot für eine Massanfertigung erstellen: <a href="http://www.supermagnete.ch/custom_form.php">www.supermagnete.ch/custom_form.php</a></p>

Abbildung 5.2: Sicherheitshinweise des Herstellers für den Umgang mit Supermagneten

# 6 Durchführung (im Praktikum)

Bitte führen Sie die nachfolgenden Punkte nacheinander durch:

## 6.1 Eingewöhnung

Spielen Sie mit der Versuchsanordnung, wobei Sie sich mit der Beobachtungstechnik vertraut machen und Fehlerquellen erkennen sollten. Lesen Sie sich die ausliegende Bedienungsanleitung für die Rechner gründlich durch.

Zeichnen Sie eine Versuchsskizze in Ihr Protokollheft. Überprüfen Sie vor der Messung, ob der Tisch waagrecht ausgerichtet ist. Legen Sie dazu den Puck in die Mitte des Tisches (außerhalb der Reichweite magnetischer Gegenstände!). Fängt er sehr schnell an, in eine bestimmte Richtung zu gleiten, so korrigieren Sie die Höhe der Standfüße des Lufttisches solange, bis der Puck liegen bleibt (ein wenig Bewegung wird immer durch den Luftstrom hervorgerufen, diese ist aber nicht in eine bestimmte Richtung orientiert).

## 6.2 Messung

Geben Sie für alle gemessenen Größen die zugehörigen Fehler an. Die Puckmasse wird als eine Masseinheit ( $m = 1$  ME) angenommen, ebenso werden Zeit und Länge nur in Zeiteinheiten (ZE) bzw. Längeneinheiten (LE) betrachtet.

Starten Sie bei allen Versuchen die Aufnahme mit dem Abschluss von Puck 1 und beenden Sie sie, bevor einer der Pucks die Bande berührt. Den genauen Zeitpunkt des Stoßes bestimmt man, indem man die Punkte *von hinten nach vorne* durchnummeriert.

Vor dem Stoß sollte sich Puck 2 in Ruhe in der Mitte des Tisches befinden. Achten Sie darauf, dass Sie auch genügend Aufnahmen der Bewegung von Puck 1 vor dem Stoß haben.

### 6.2.1 Vollkommen elastischer Stoß:

In diesem Versuchsteil soll der Impuls- und Energieerhaltungssatz experimentell bestätigt werden. Nehmen Sie die beiden magnetischen Pucks und platzieren Sie  $P_2$  ungefähr in der Tischmitte. Die Anfangsgeschwindigkeit  $v_2$  soll null sein, darum sollte  $P_2$  bis zum Abschluss von  $P_1$  festgehalten werden.  $v_1$  darf nicht so groß sein, dass sich die beiden Pucks berühren, aber auch nicht zu klein, da sonst die nicht vermeidbare Restreibung auf dem Tisch die Pucks zu stark bremst. Versuchen Sie außerdem  $P_2$  dicht neben der Mitte zu treffen (kleiner Stoßparameter aber kein zentraler Stoß). Probieren Sie verschiedene Anfangsbedingungen aus und nehmen Sie dann eine Bahn mit dem Computer auf.

### 6.2.2 Vollkommen inelastischer Stoß:

Nun soll die Drehimpulserhaltung beim vollkommen inelastischen Stoß überprüft werden. Verwenden Sie dazu die unmagnetischen Pucks, die mit Klettband versehen sind. Hier empfiehlt sich ein großer Stoßparameter, um einen größeren Drehimpuls zu erzeugen. Probieren Sie auch hier verschiedene Anfangsbedingungen aus, bevor Sie eine Bahn aufnehmen.

# 7 Auswertung und Diskussion (zu Hause)

Bitte führen Sie zu jedem Wert eine Fehlerrechnung durch. Geben Sie alle verwendeten Formeln an und erläutern Sie kurz, was Sie tun und warum. Beschriften Sie die Diagramme vollständig (was ist auf den Achsen aufgetragen?). Die korrekte Form zur Angabe von Ergebnissen, sowie Hinweise zur Fehlerrechnung entnehmen Sie bitte den allgemeinen Hilfen<sup>1</sup>.

## 7.1 Vollkommen elastischer Stoß

Impuls- und Energieerhaltungssatz beim vollkommen elastischen Stoß sollen graphisch überprüft werden.

### 7.1.1 Parametrisierung

Zunächst müssen die Aufnahmen im Hinblick auf die (richtungsabhängige) Momentangeschwindigkeit der einzelnen Pucks ausgewertet werden, um daraus im Verlauf Einzelimpulse und Einzelenergien sowie Gesamtimpulse und Gesamtenergien zu bestimmen. Eine Auftragung gegen die Zeit visualisiert die Änderung der genannten Größen.

- Zeichnen Sie ein Koordinatensystem *auf den Ausdruck* (Abpausen würde unnötig das tatsächliche Messergebnis verschlechtern). Eine Ausrichtung der x-Achse in  $v'_1$  Richtung (also nach dem Stoß) sollte zur Folge haben dass die y-Achse in Richtung  $v'_2$  zeigt. Alternativ könnte man die x-Achse aber auch in  $v_1$  Richtung (vor dem Stoß) legen oder etwa parallel zum Seitenrand (also unabhängig vom System).
- Markieren Sie alle Punkte vor dem Erreichen von  $v_0$ , also während der initialen Beschleunigung. Diese werden nicht weiter betrachtet und im folgenden verworfen.
- Nummerieren Sie Punkte der beiden Pucks, die gleichzeitig aufgenommen wurden gleich. Eine gute Methode ist es gedanklich von hinten (also mit dem letzten aufgenommenen Frame) anzufangen, so ergibt sich eindeutig, welche Punkte gleichzeitig aufgenommen wurden.
- Bestimmen Sie die Abstände jeweils zwischen zwei aufeinander folgenden Punkten in  $x$ - und in  $y$ -Richtung für beide Pucks (für die Bestimmung der Impulse in die jeweilige Richtung); sowie die gesamte Distanz  $d$  zweier aufeinander folgender Punkte (für die Gesamtgeschwindigkeit der jeweiligen Pucks, welche für die Bestimmung der Translationsenergien benötigt wird). Tragen Sie die Messungen in Tabelle 7.1 ein. Dabei muss nicht zwischen vor und nach dem Stoß unterschieden werden.

---

<sup>1</sup> zu finden im Unteren Bereich auf <https://teaching.astro.uni-koeln.de/AP>

### 7.1.2 Impulserhaltung

- Verbinden Sie jeweils beide zeitgleich aufgenommenen Punkte von Puck 1 und Puck 2 und markieren Sie stets den Mittelpunkt der Verbindungslinie (dieser markiert den gemeinsamen Schwerpunkt beider Pucks). Das beinhaltet auch alle Zeitpunkte vor dem Stoß!
- Bewegt sich der gemeinsame Schwerpunkt entlang einer Geraden?

---

---

---

- Tragen Sie die Einzelimpulse in  $x$ -Richtung von Puck 1 und 2 in einem gemeinsamen Diagramm 7.1a gegen die Zeit auf.
- Tragen Sie die Einzelimpulse in  $y$ -Richtung von Puck 1 und 2 in einem gemeinsamen Diagramm 7.1b gegen die Zeit auf. Was fällt auf?

---

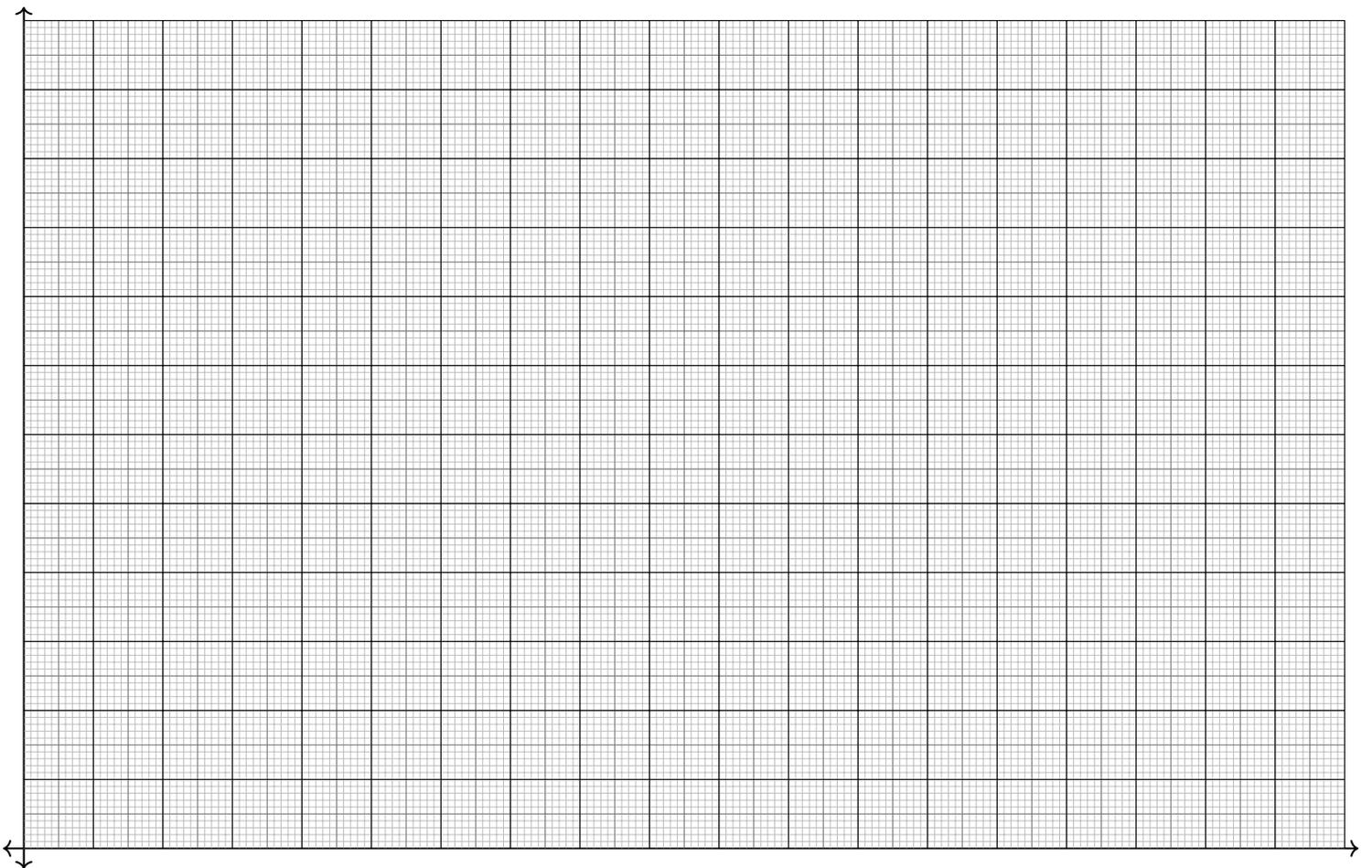
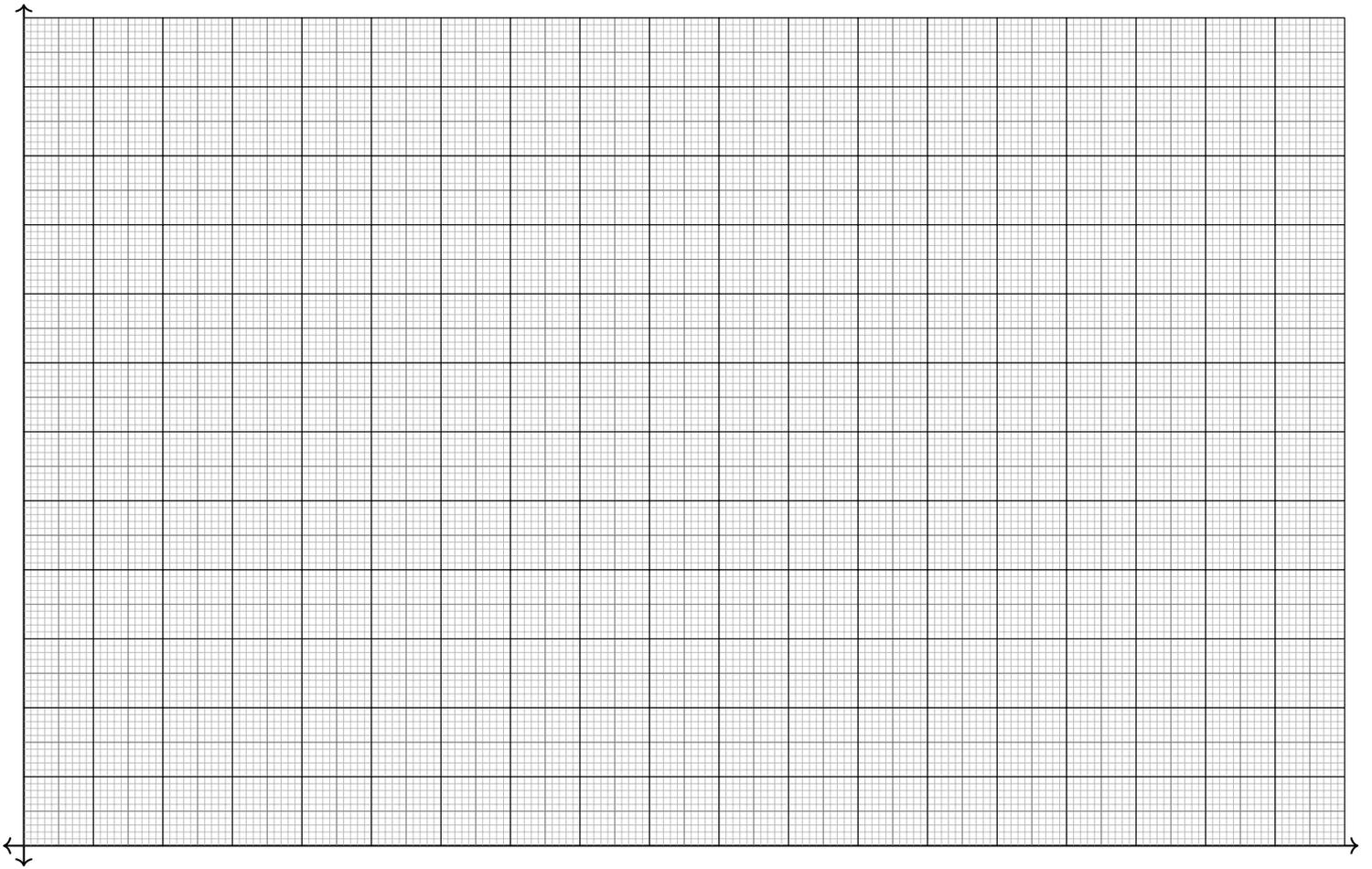
---

---

---

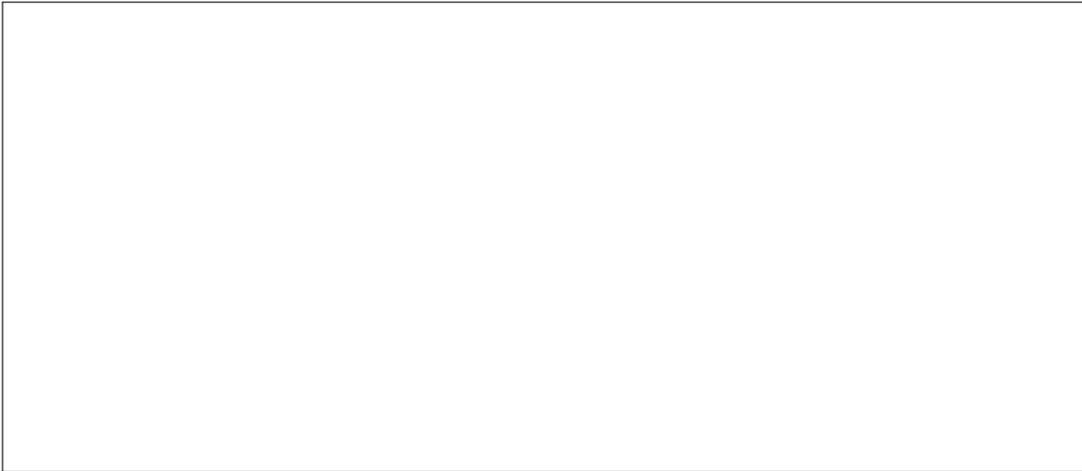
	Puck 1			Puck 2		
#	$x_1$	$y_1$	$d_1$	$x_2$	$y_2$	$d_2$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
geschätzter Fehler der Messwerte						
$\Delta$						

**Tabelle 7.1:** Einzelimpulse



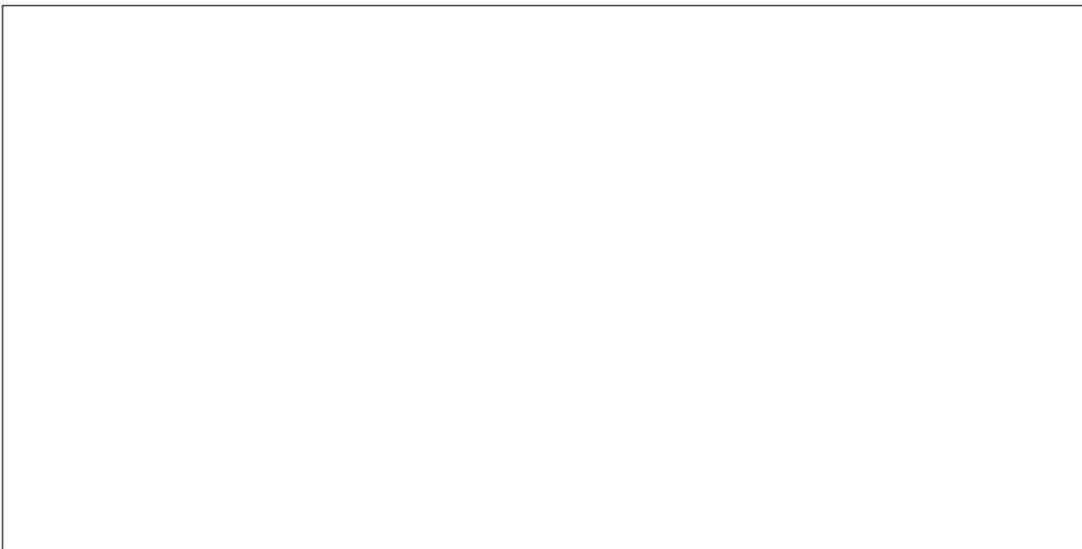
**Abbildung 7.1:** **a:** Impulse in  $x$ -Richtung von Puck 1 & 2. **b:** Impulse in  $y$ -Richtung von Puck 1 & 2.

- Bestimmen Sie aus den gemessenen Werten den Gesamtimpuls des Systems jeweils in  $x$  und  $y$  Richtung und tragen Sie die Werte in Tabelle 7.2 ein. Geben Sie die Formeln sowie die Fehlerformeln hier an.



- Tragen Sie den Gesamtimpuls in  $x$ -Richtung in Diagramm 7.2a gegen die Zeit auf und bestimmen sie die Steigung und deren Fehler mit Hilfe einer graphischen Geradenanpassung.

Geradenanpassung:



- Tragen Sie den Gesamtimpuls in  $y$ -Richtung in Diagramm 7.2b gegen die Zeit auf und bestimmen sie die Steigung und deren Fehler mit Hilfe einer graphischen Geradenanpassung.

Geradenanpassung:



- Sind die Verläufe im Rahmen ihrer Fehlergrenzen wie erwartet? Und wenn nicht welche Ursache könnte dies haben?

---

---

---

---

---

---

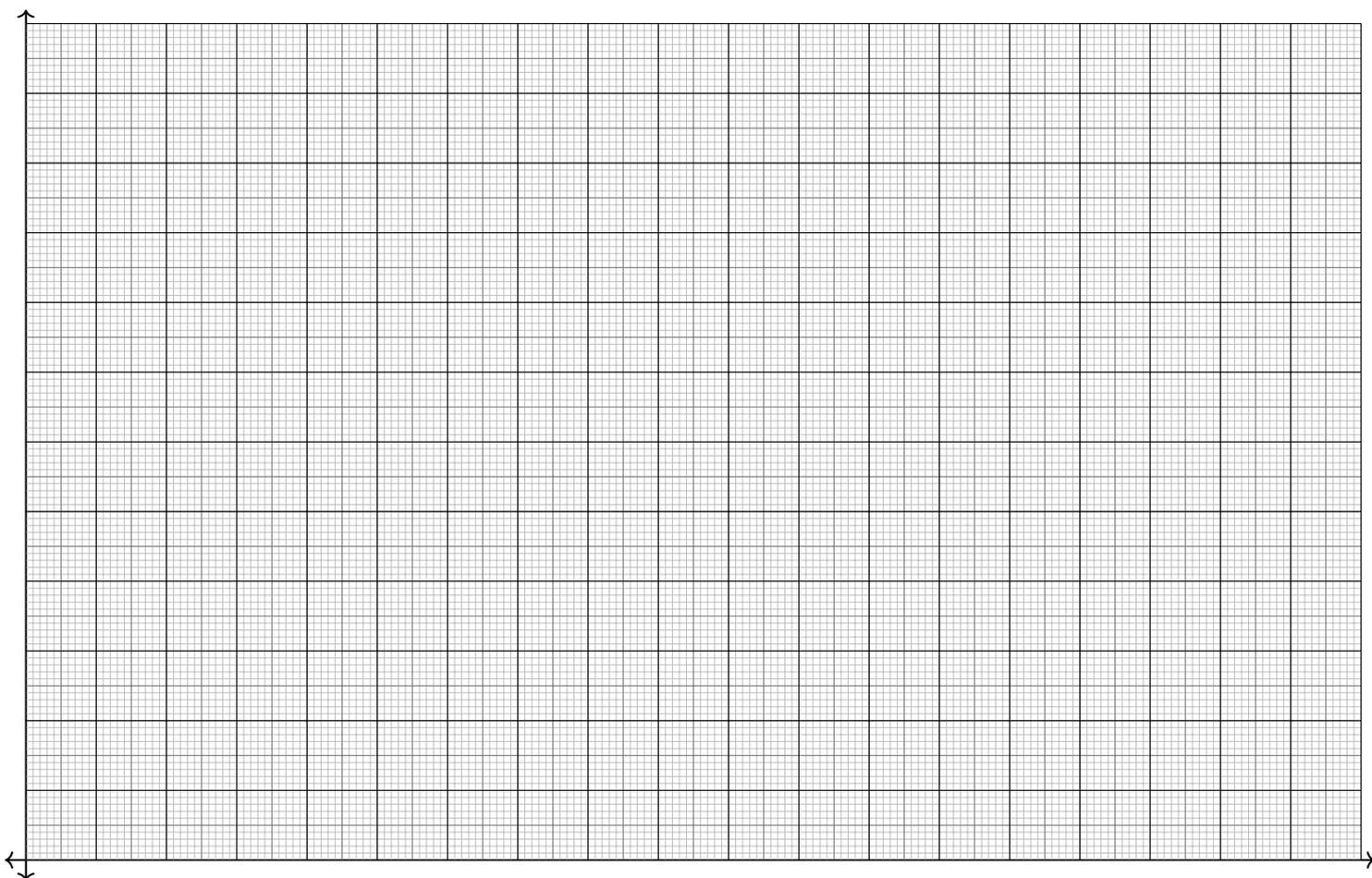
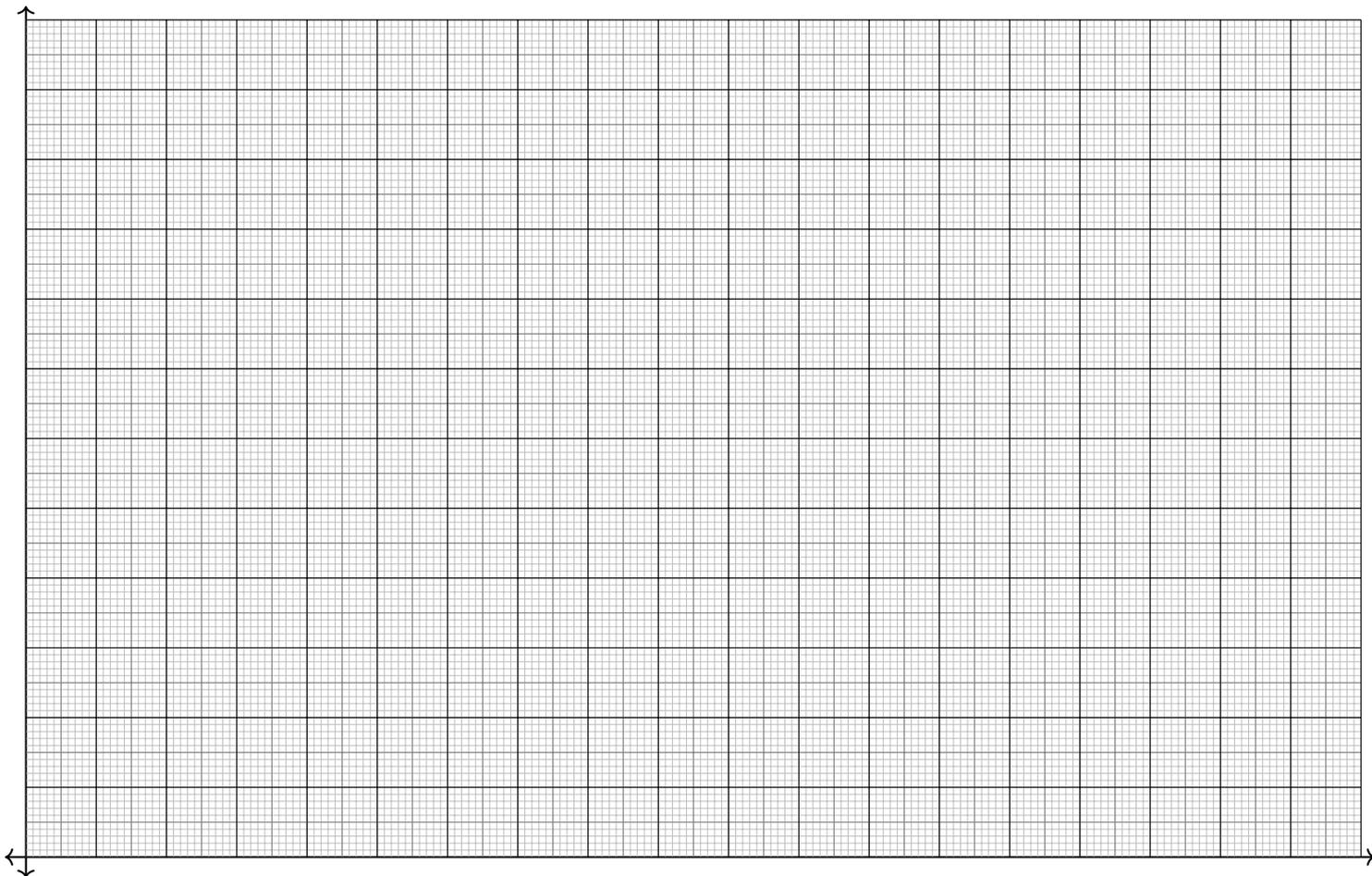
---

#	$p_{x,ges}$	$p_{y,ges}$	$E_{kin,1}$	$\Delta E_{kin,1}$	$E_{kin,2}$	$\Delta E_{kin,2}$	$E_{kin,ges}$	$\Delta E_{kin,ges}$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								

Fehler der Gesamtimpulse

$\Delta$	
----------	--

**Tabelle 7.2:** Gesamtimpulse und Energien



**Abbildung 7.2:** **a:** Gesamtimpuls in x-Richtung. **b:** Gesamtimpuls in y-Richtung.

### 7.1.3 Energieerhaltung

- Bestimmen Sie aus den gemessenen Werten die Energie der einzelnen Pucks und des Gesamtsystems und tragen Sie die Werte in Tabelle 7.2 ein. Geben Sie die Formeln sowie die Fehlerformeln hier an.

- Tragen sie die Einzelenergien beider Pucks in Abbildung 7.3a gegen die Zeit auf. Was fällt auf?

---

---

---

- Tragen sie die Gesamtenergie des Systems in Abbildung 7.3b gegen die Zeit auf und bestimmen sie die Steigung des Verlaufs mit Hilfe einer graphischen Geradenanpassung.  
Geradenanpassung:

- Was erwartet man für den Verlauf der Gesamtenergie und konnte dies im Experiment beobachtet werden?

---

---

---

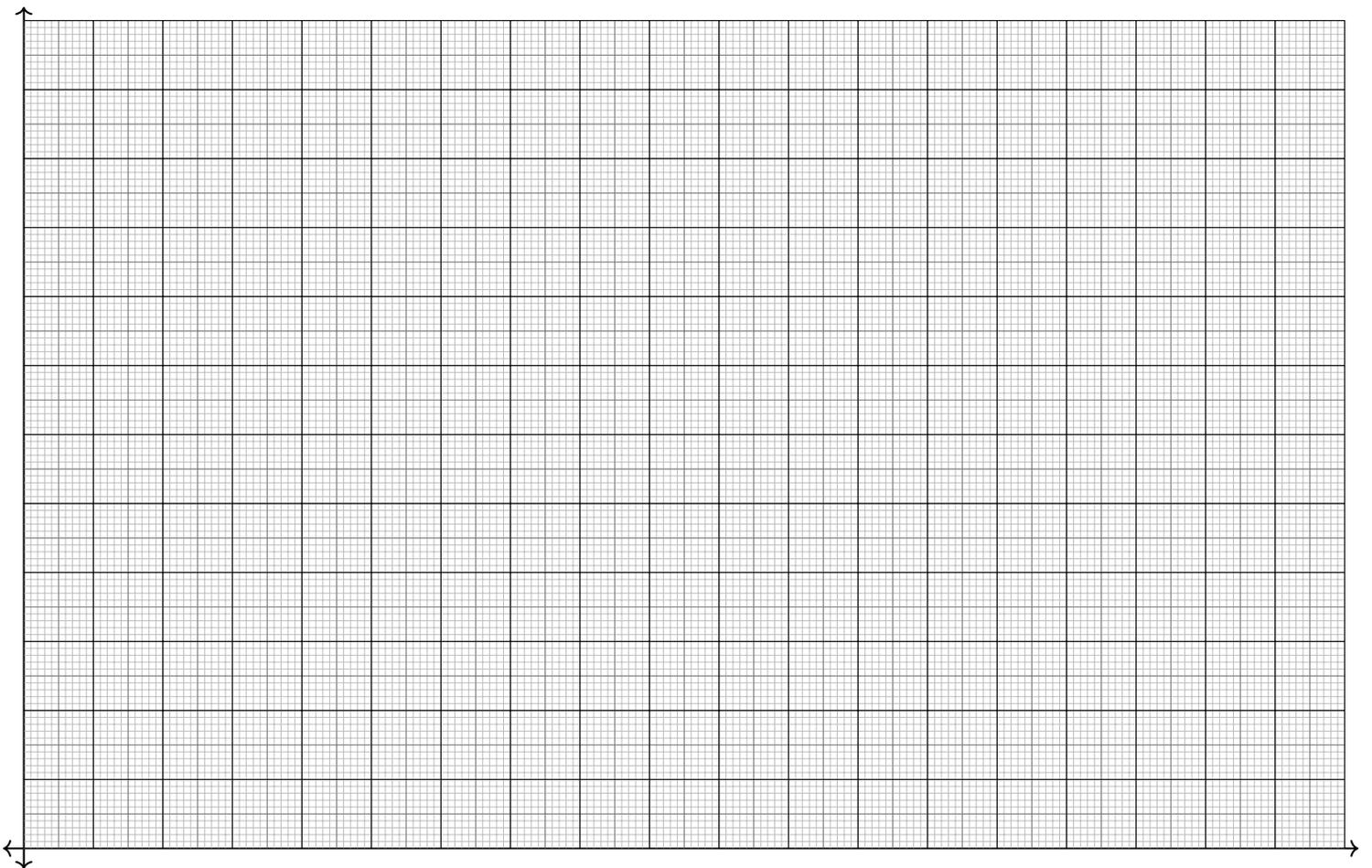
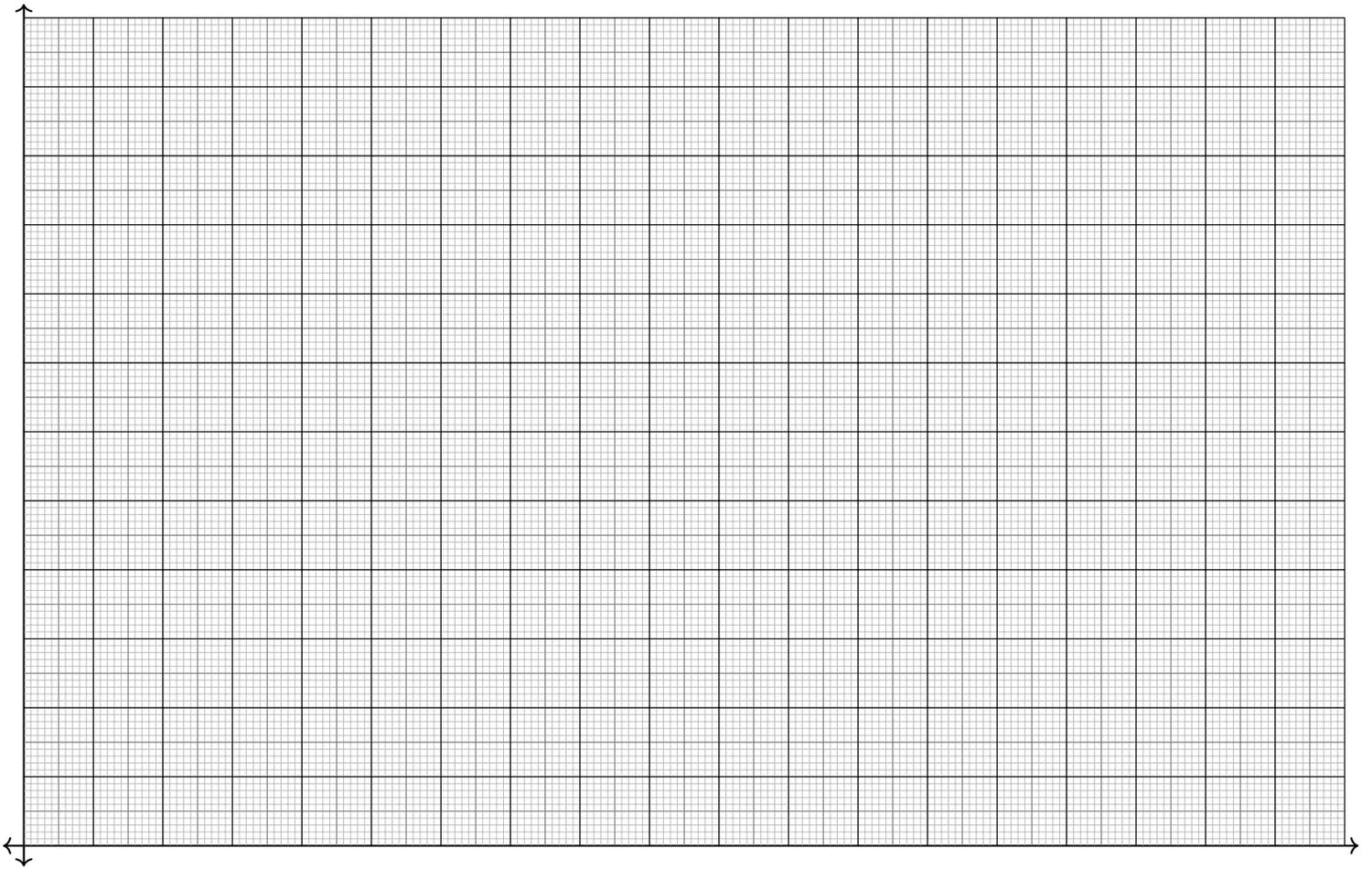
---

---

---

---

---



**Abbildung 7.3:** **a:** Translationsenergie von Puck 1 & 2. **b:** Gesamtenergie beider Pucks.

## 7.2 Vollkommen inelastischer Stoß:

Überprüfen Sie nun die Drehimpulserhaltung beim vollkommen inelastischen Stoß. Berechnen Sie dazu den Drehimpuls des Systems vor und nach dem Stoß. *Achtung:* Berücksichtigen Sie, dass Sie den Drehimpuls nach dem Stoß über die Winkelgeschwindigkeit im Schwerpunktsystem ermitteln und Sie den Drehimpuls vor dem Stoß daher auch im Schwerpunktsystem bestimmen müssen. Siehe hierzu Abschnitt 8.4

Dazu verlängert man *vor* dem Stoß die Trajektorie entlang welcher sich der Puck  $P_1$  mit der gleichförmigen Geschwindigkeit  $\mathbf{v}_0$  bewegt und misst den Stoßparameter  $a$  senkrecht zu der eingezeichneten Linie. Außerdem ermittelt man über möglichst viele Frames die Geschwindigkeit  $\mathbf{v}_0$  von Puck  $P_1$ , indem man die zurückgelegte Strecke  $s$  in der Zeit  $t = n - 1$  zwischen der Anzahl der Frames  $n$  aufnimmt. Eingesetzt in die Formel 2.1 bedeutet dies,

dass  $\mathbf{r}(a) = \underline{\hspace{2cm}}$  und  $\mathbf{p}(s, t) = \underline{\hspace{2cm}}$  für jeden der beiden Pucks ist und somit letzten Endes Gleichung 4.5 gilt.

*Nach* dem Stoß wird der Drehimpuls über das Trägheitsmoment der vereinigten Pucks (beschrieben in Gleichung 4.6) und dem in der Zeit  $t = n - 1$  beschriebenen Winkel  $\phi$  bestimmt. Zeichnet man Verbindungslinien zwischen den beiden Pucks in jeweils gleichzeitig aufgenommenen Frames, so ist jeweils die Länge der Linie zu jedem Zeitpunkt  $2R$ , wobei  $R$  der Radius eines Pucks ist, da die LEDs in der Mitte der Pucks sitzen. Verlängert man nun zwei dieser Verbindungslinien (möglichst mit einigen Frames dazwischen zwecks Zeitfehler-Minimierung), kann man den Winkel am Schnittpunkt der verlängerten Linie messen.

### 7.2.1 Drehimpuls vor dem Stoß

- Messen Sie die Geschwindigkeit  $v_0$  des beschleunigten Pucks an einer Stelle, an der sich die Geschwindigkeit nicht mehr ändert. Zeichnen Sie dies auf dem Ausdruck ein. Wie lang ist die Strecke  $s$  und wie viele Zeitschritte  $n_t$  liegen dazwischen? Notieren Sie die gemessenen Werte auf dem Ausdruck.
- Berechnen Sie  $v_0$  (inklusive Fehler)

- Ziehen Sie eine Linie durch die Punkte anhand derer die Geschwindigkeit  $v_0$  bestimmt wurde und verlängern Sie diese in Richtung von  $v_0$  (auf dem Ausdruck). Messen Sie den Stoßparameter an der Stelle, an der sich Puck 2 in Ruhe befand bevor dieser von Puck 1 gestoßen wurde. Zeichnen Sie dazu senkrecht zur verlängerten  $v_0$ -Linie eine Linie, die die Warteposition von Puck 2 schneidet und messen Sie den Stoßparameter  $a$ , also den Abstand zwischen Warte-Punkt und  $v_0$ -Linie.

$$a = \text{_____}, \quad \Delta a = \text{_____}$$

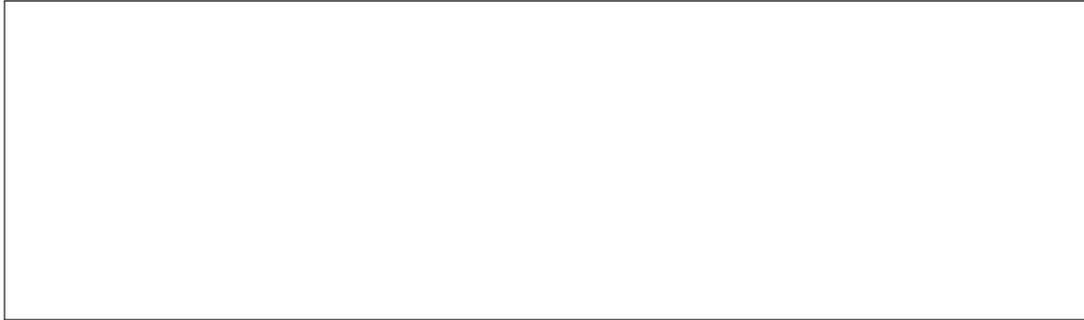
- Berechnen Sie nun den Drehimpuls vor dem Stoß mit Hilfe von Formel 4.5.



$$L_{\text{vor}} = \text{_____}, \quad \Delta L = \text{_____}. \quad \frac{\Delta L}{L} = \text{_____}\%.$$

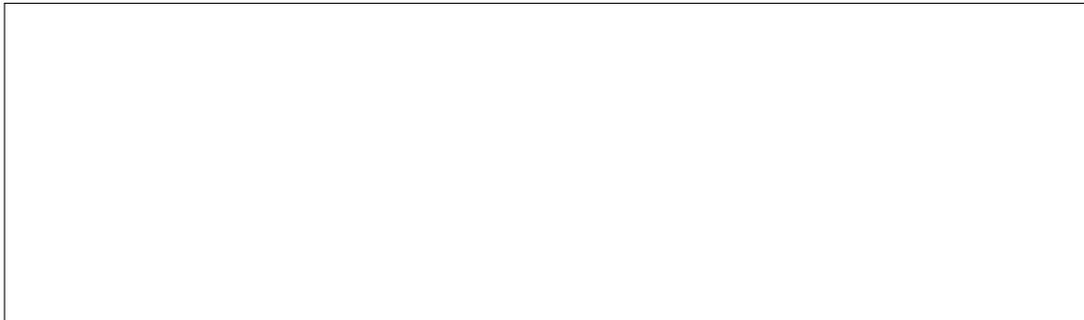
### 7.2.2 Drehimpuls nach dem Stoß

- Verbinden Sie gleichzeitig aufgenommene Punkte von Puck 1 und 2 (dieses mal nur nach dem Stoß). Nach dem Stoß sollte der Abstand zwischen beiden Pucks immer konstant sein ( $2 \times$  der Radius). Auch dieses mal bietet es sich an mit dem letzten Frame zu beginnen. Bestimmen Sie den Radius der Pucks.



$$R = \text{_____}, \quad \Delta R = \text{_____}$$

- Verlängere zwei dieser Verbindungslinien die nach dem Stoß aufgenommen wurden und messe den Winkel  $\phi$ [rad] zwischen beiden. Wie viele Zeitschritte  $n$  liegen zwischen beiden Aufnahmen? Berechnen Sie daraus die Winkelgeschwindigkeit  $\omega = \frac{\phi}{n}$ .



$$\omega = \text{_____}, \quad \Delta\omega = \text{_____}$$

- Bestimmen Sie nun den Drehimpuls nach dem Stoß.



$$L_{\text{nach}} = \text{_____}, \quad \Delta L = \text{_____}. \quad \frac{\Delta L}{L} = \text{_____}\%.$$

Konnte die Drehimpulserhaltung in Ihrem Experiment bestätigt werden?

---

---

---

---

---

---

---

---

## Evaluation

Gibt es etwas das Sie an der Versuchsanleitung inhaltlich oder technisch ändern würden? Ist beispielsweise etwas nicht oder unzureichend erklärt, Lücken zu klein etc.? Änderungsvorschläge werden wir ggf. schon im Semester umsetzen.

---

---

---

---

# 8 Anhang: Hinweise zur Herleitung der Formeln

## 8.1 Stoßwinkel beim vollkommen elastischen Stoß

Beim vollkommen elastischen Stoß sind die Translationsenergie und der Impuls erhalten. Für zwei Pucks der Masse  $m$  mit Anfangsgeschwindigkeiten  $\vec{v}_2 = 0$  und  $\vec{v}_1$  und Endgeschwindigkeiten  $\vec{v}_1'$  und  $\vec{v}_2'$  gilt also:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}mv_1'^2 + \frac{1}{2}mv_2'^2 \quad (8.1)$$

$$\text{und } m\vec{v}_1 = m\vec{v}_1' + m\vec{v}_2' . \quad (8.2)$$

(8.2) kann man umformen zu

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_1' + \vec{v}_2' .$$

Einsetzen in (8.1) liefert (bitte beachten Sie dabei das Skalarprodukt '·')

$$\begin{aligned} (\vec{v}_1' + \vec{v}_2')^2 &= v_1'^2 + v_2'^2 \\ \Leftrightarrow v_1'^2 + 2\vec{v}_1' \cdot \vec{v}_2' + v_2'^2 &= v_1'^2 + v_2'^2 \\ \Leftrightarrow \vec{v}_1' \cdot \vec{v}_2' &= 0 \\ \Leftrightarrow \sphericalangle(\vec{v}_1', \vec{v}_2') &= 90^\circ . \end{aligned} \quad (8.3)$$

## 8.2 Drehimpuls vor dem Stoß

Für die Berechnung des Drehimpulses vor dem Stoß möchte man leicht messbare Größen verwenden. Dafür bieten sich die zurückgelegte Strecke  $s$ , die dafür benötigte Zeit  $t$  und der Stoßparameter  $a$  an. Gegeben ist der Drehimpulsvektor  $\vec{L}$  aber zunächst durch den Ortsvektor  $\vec{r}$  und den Impulsvektor  $\vec{p}$ :

$$\vec{L}_{Puck} = \vec{r} \times \vec{p}$$

Der Betrag von  $\vec{L}_{Puck}$  ist dann:

$$\begin{aligned} \rightarrow L_{Puck} &= \sin[\sphericalangle(\vec{r}, \vec{p})] \cdot r \cdot p \\ &= r_{\perp} \cdot p \\ &= a \cdot m \frac{s}{t} \end{aligned} \quad (8.4)$$

### 8.3 Trägheitsmoment

Das Trägheitsmoment eines Zylinders mit Masse  $m$  und Radius  $R$  bezüglich seiner Symmetrieachse lautet:

$$I_{Puck} = \frac{1}{2}mR^2$$

Lässt man diesen Zylinder um eine Achse auf seinem Rand rotieren, so ergibt sich aus dem Satz von Steiner das Trägheitsmoment zu:

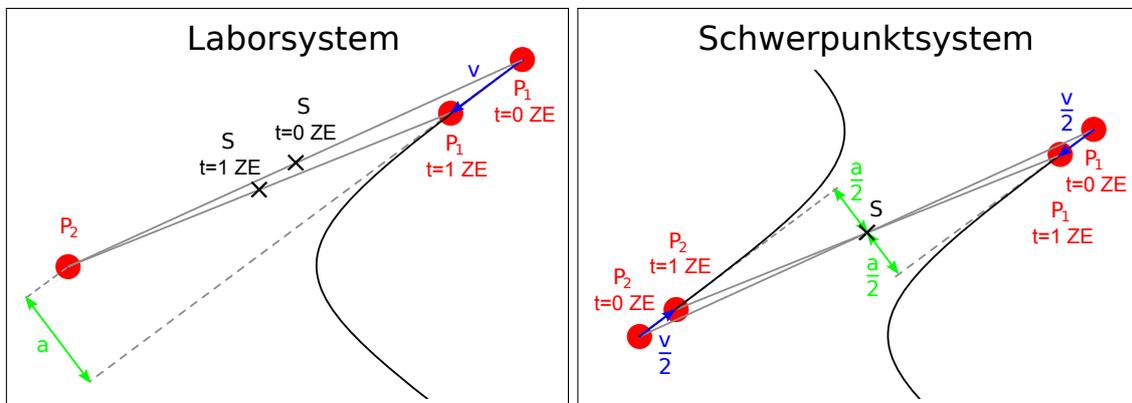
$$\begin{aligned} I_{R,Puck} &= I_{Puck} + mR^2 \\ &= \frac{3}{2}mR^2 \end{aligned}$$

Für zwei verbundene Pucks, die um ihren gemeinsamen Schwerpunkt rotieren ist das Trägheitsmoment demnach:

$$I_{2Pucks} = 3mR^2 \tag{8.5}$$

### 8.4 Wechsel vom Labor- ins Schwerpunktsystem

Beim vollkommen inelastischen Stoß ist es am einfachsten, den Drehimpuls vor dem Stoß im Laborsystem zu ermitteln, den nach dem Stoß jedoch im Schwerpunktsystem. Damit man beide Drehimpulse vergleichen kann, müssen sie jedoch im selben Bezugssystem gegeben sein. Daher ist es nötig den Drehimpuls vor dem Stoß vom Laborsystem ins Schwerpunktsystem zu transformieren.



**Abbildung 8.1:** Links: Im Laborsystem bewegt sich Puck 1 mit Geschwindigkeit  $v$  auf Puck 2 zu. Puck 2 befindet sich in Ruhe im Ursprung des Koordinatensystems. Die Senkrechtekomponente  $r_{\perp}$  des Ortsvektors von Puck 2 ist genau der Stoßparameter  $a$ . In diesem Bezugssystem bewegt sich auch der Schwerpunkt des Systems auf Puck 2 zu. Rechts: Im Schwerpunktsystem bewegen sich Puck 1 und Puck 2 jeweils mit Geschwindigkeit  $\frac{v}{2}$  auf den Schwerpunkt zu. Der Schwerpunkt befindet sich in Ruhe im Ursprung des Koordinatensystems. Die Senkrechtekomponente  $r_{\perp}$  der Ortsvektoren von Puck 1 und 2 ist hier genau der halbe Stoßparameter  $r_{\perp} = \frac{a}{2}$ .

Abbildung 8.1 zeigt, wie die beiden Bezugssysteme zusammenhängen. Während sich der Drehimpuls im Laborsystem wie in Gl. (8.4) berechnet, muss man im Schwerpunktsystem

den Drehimpuls bezüglich des Schwerpunkts für beide Pucks berechnen und addieren. Für Puck  $i$  ( $i = 1, 2$ ) ist der Drehimpuls bezüglich des Schwerpunktes

$$\begin{aligned}\vec{L}_i &= \vec{r}_i \times \vec{p}_i \\ \Rightarrow L_i &= \frac{a}{2} \cdot m \frac{v}{2} \\ &= \frac{1}{4} \cdot am \frac{s}{t}.\end{aligned}\tag{8.6}$$

Der Gesamtdrehimpuls vor dem Stoß ist daher im Schwerpunktsystem

$$\begin{aligned}L_{vorher} &= L_1 + L_2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot am \frac{s}{t}.\end{aligned}\tag{8.7}$$

## 9 Literatur

- Fehlerrechnung:  
<https://www.astro.uni-koeln.de/AP/>
- Demtröder: Experimentalphysik 1, Springer, 2021  
<https://katalog.ub.uni-koeln.de/portal/databases/id/inst001/titles/id/8404497.html>
- Halliday: Physik, Wiley-VCH, 2. Auflage, 2009
- Meschede: Gerthsen Physik, Springer, Berlin, Heidelberg, 25. Aufl., 2015  
<https://katalog.ub.uni-koeln.de/portal/databases/id/inst001/titles/id/6798887.html>
- Tipler: Physik, Heidelberg, Spektrum, Akad. Verlag, 1994