

Low Cost Kinematik-Experimente

- Mit Luftkissenscheiben aus dem 3D-Drucker -

Paul Schlummer*, Alexander Pusch*

*Institut für Didaktik der Physik
Westfälische Wilhelms-Universität
Wilhelm-Klemm-Str. 10
48149 Münster

paul.schlummer@wwu.de, alexander.pusch@wwu.de

Kurzfassung

Experimente zur Kinematik sollen Zusammenhänge zwischen Kraft, Bewegung und Impulsübertragung aufzeigen und vermitteln. Im schulischen Kontext ist es üblich, dass diese Experimente stark idealisiert werden und insbesondere der Einfluss von Reibung so weit wie möglich minimiert wird. Für diesen Zweck werden häufig unhandliche, laute – und vor allem teure – Luftkissenbahnen verwendet. Diese ermöglichen zwar das Experimentieren fast ohne Reibungsverluste, sind jedoch auf die Bewegung in einer Dimension beschränkt und nur als Demonstrationsaufbau geeignet. Mithilfe von Luftkissenscheiben aus dem 3D-Drucker ist es möglich, neben Demonstrationsversuchen auch eine Vielzahl von kostengünstigen Schülerexperimenten durchzuführen, die einen realistischen, zweidimensionalen Zugang zur Mechanik der Stoßprozesse ermöglichen. In diesem Beitrag werden neben möglichen Experimenten auch die Ergebnisse einer Videoanalyse bezüglich der Elastizität der Stöße sowie dem Einfluss der Reibung vorgestellt.

1. Einleitung

Die Gesetzmäßigkeiten der Newton'schen Mechanik begegnen Lernenden nicht nur überall im Alltag, sondern auch recht früh in ihrer schulischen Laufbahn. Sowohl der Begriff der *Kraft*, als auch der Begriff der *Geschwindigkeit* werden dabei schon in der Sekundarstufe I quantitativ thematisiert – etwa im Kontext von ‚einfachen Maschinen‘ oder im Bereich ‚Physik und Sport‘ [1]. In der Sekundarstufe II wird das Thema Kinematik in der Regel in der Einführungsphase durch die Betrachtung von *Beschleunigung* und *Impuls* vertieft [2].

Aus Schülersicht ist dabei von besonderer Bedeutung, dass es sich um vektorielle Größen handelt. Mit diesem neuen mathematischen Konzept muss ein angemessener fachlicher Umgang erst einmal eingeübt werden. Aus pragmatischer Sicht scheint deshalb eine Beschränkung zunächst auf eindimensionale Bewegungen zum Zwecke der Vereinfachung zwar naheliegend, jedoch ist aus fachdidaktischer Sicht diskussionswürdig, ob ein solches Vorgehen den Lernenden tatsächlich hilft, ein angemessenes Verständnis von Kraft und Geschwindigkeit zu erlangen [3]. Um Lernenden den Aufbau von adäquaten Konzepten in der Mechanik zu erleichtern, schlägt dagegen z. B. Wilhelm [3;4] einen Ansatz vor, in dem von vornherein die relevanten Größen mindestens in zweidimensionaler Form eingeführt werden, anstatt zunächst eindimensional zu argumentieren und diesen Ansatz erst später auf mehrere Dimensionen auszuweiten.

Möchte man diesen Ansatz in die Praxis umsetzen, stellt sich die Frage nach geeigneten Experimenten. Zu vielen Teilgebieten der Statik ließe sich eine ganze Reihe von alltagsnahen Experimenten aufzählen, mit denen abwechslungsreicher und motivierender Unterricht gestaltet werden kann [5]. In der Kinematik allerdings erschwert die allgegenwärtige Reibung das experimentelle Nachvollziehen der im Unterricht vermittelten idealen physikalischen Gesetzmäßigkeiten: Beispielsweise ist es unter normalen Bedingungen praktisch nicht möglich, eine annähernd gleichförmige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit zu realisieren und so z. B. das erste Newton'sche Axiom zu veranschaulichen. Die Erfahrungstatsache, dass auf der Erde alle Bewegungen früher oder später zum Erliegen kommen, wenn keine zusätzliche Krafteinwirkung stattfindet, wird im Alltag immer wieder bestätigt und erschwert daher den Konzeptwechsel [6]. Das erste Newton'sche Axiom verkommt dadurch oft zu einem „Spezialfall“, der keine Relevanz im Alltag hat. Bekannte Lehrmittelhersteller schaffen hier Abhilfe: Eine Luftkissenbahn mit entsprechendem Zubehör ermöglicht das Experimentieren unter nahezu reibungsfreien Bedingungen und gehört quasi zur Standardausstattung vieler Schulsammlungen – aufgrund des recht hohen Anschaffungspreises von über 1000 € allerdings eher als ein Einzelstück für Demonstrationsversuche. Neben dem hohen Preis und den begrenzten Einsatzmöglichkeiten in Schülerexperimenten gibt es noch eine Reihe weiterer Aspekte, die sich beim Arbeiten mit der Luftkissen-

bahn im Schulalltag als problematisch erweisen können. Zu nennen sind hier vor allem:

- **Die Lautstärke des Gebläses.** Eine an unserem Gerät durchgeführte Messung des Schalldruckpegels ergab in der typischen Arbeitsposition Messwerte zwischen 75 dB und 80 dB, was in etwa der Lautstärke in der Nähe einer vielbefahrenen Straße entspricht. Dieser Geräuschpegel erschwert massiv die Kommunikation zwischen Lehrkraft und Lernenden während des Experimentierens und ist einer angenehmen, lernförderlichen Arbeitsatmosphäre vor allem über längere Zeiträume hinweg alles andere als zuträglich.
- **Der hohe Grad an Idealisierung.** Neben der durchaus erwünschten Minimierung der Reibung, wird der elastische Stoß oft durch auf die Schlitten gespannte Gummibänder und der inelastische Stoß durch einen aufmontierten Dorn und Knete realisiert. Beide Faktoren machen den Übertrag auf Alltagssituationen schwer, ermöglichen aber zugegebenermaßen die sehr gute Näherung an die idealisierte Theorie.
- **Die Beschränkung auf eine Dimension.** Vor allem zum Einstieg erscheint aus fachlicher Sicht die Beschränkung auf eine Dimension und somit die Realisierung des zentralen Stoßes unter bestimmten Gesichtspunkten auf den ersten Blick durchaus sinnvoll. Im Alltag und der Lebenswelt der Lernenden finden sich aber vor allem dezentrale Stöße wie z. B. beim Billard oder im Autoscooter. Der eigentliche Spezialfall des zentralen Stoßes wird im Physikunterricht zum exemplarischen Gegenstand, an dem allgemein die Stoßprozesse abgehandelt werden, was nicht nur zu einer Entfremdung des Unterrichts von der Lebenswelt beiträgt, sondern gegebenenfalls, auch beim Übergang auf mehrere Dimensionen den Konzeptwechsel erschwert [3]. Die höhere Lernwirksamkeit eines von vornherein auf zwei Dimensionen ausgerichteten Ansatzes ist z. B. auch von Tobias et al. bestätigt worden [7].

2. Materialien für Schülerexperimente und Mechanik in 2D

Um den oben skizzierten Einschränkungen und Problemen zu begegnen und vor allem auch Schülerversuche bereitzustellen, gibt es bereits verschiedene Lösungen, die nachfolgend dargestellt werden.

2.1. Bisherige Materialien & Experimente

Es existieren bereits verschiedene Varianten von Luftkissengleitern, die nicht auf eine feste Bahn

angewiesen sind, sondern ihr Luftkissen jeweils selbst erzeugen. Hier sind vor allem Luftballonbetriebene Luftkissengleiter in verschiedenen Ausführungen zu nennen, z. B. [8], basierend auf [9], die sich auch als einfacher Eigenbau mit CDs realisieren lassen. Der Einsatz batteriebetriebener Luftkissenpucks [10] ermöglicht ein längeres Experimentieren ohne Unterbrechungen durch Aufpusten des Ballons. All diese Varianten sind vergleichsweise günstig in Anschaffung bzw. Herstellung und ermöglichen den Einsatz des Materials in zweidimensionalen Schülerversuchen. In qualitativen Experimenten ist der Einfluss der Reibung augenscheinlich gering.

2.2. Luftkissenscheiben aus dem 3D-Drucker

In unseren Versuchen verwenden wir eine Weiterentwicklung der in [8] und [9] skizzierten Luftkissenscheibe, die sich mit dem 3D-Drucker automatisiert und sehr kostengünstig herstellen lässt [11] (Abb. 1).



Abb.1: Zwei Luftkissenscheiben aus dem 3D-Drucker mit Ballon

Die Luftkissenscheibe aus dem 3D-Drucker weist aus schulischer Sicht viele Vorteile gegenüber den anderen Produkten auf. Neben dem geringen Preis bietet die Herstellung im 3D-Druckverfahren eine hohe Flexibilität im Design. Dies ermöglicht es, die Scheiben so zu gestalten, dass eine einfache Parametervariation möglich ist [11].

Wir verwenden für unsere Experimente verschiedene Designs (Abb. 2): Für Schülerversuche reicht ein „Basisdesign“, mit welchem elastische Stöße mit gleichen oder unterschiedlichen Massen (durch Aufstecken von M12-Muttern) möglich sind. Für unsere Messreihen setzten wir eine Variante mit Fahrradventil ein, wodurch der Ballon, der das Luftpolster für etwa eine halbe Minute Experimentierzeit herstellt, in kürzerer Zeit mit einer Fahrradpumpe wieder mit Luft gefüllt werden kann. Die stl-Vorlagen für den 3D-Drucker sind online verfügbar unter: [\[http://physikkommunizieren.de/3d-druck/luftkissenscheibe-aus-dem-3d-drucker/\]](http://physikkommunizieren.de/3d-druck/luftkissenscheibe-aus-dem-3d-drucker/)



Abb.2: Verschiedene Bauformen der verwendeten Luftkissenscheiben. Links: Einfache Variante für Schülerexperimente. Rechts: Variante mit Fahrradventil.

2.3. Experimentelle Fragestellungen

Es existieren bisher vor allem Beschreibungen möglicher Experimente mitsamt qualitativer Auswertung [8;10]. Es gibt ebenfalls bereits Arbeiten zur quantitativen Analyse der Bewegungen mit Tracker [10]. Diese Experimente mit Luftkissenscheiben bzw. -pucks beinhalten:

- Aufnahme von Weg-, Zeit- und Geschwindigkeitsdiagrammen
- Untersuchung von gleichförmigen und beschleunigten Bewegungen
- Demonstration der Newton'schen Axiome
- Qualitative & spielerische Charakterisierung von Stößen
- Untersuchung der Energie- und Impulsbilanz bei Stößen
- g -Bestimmung an der schiefen Ebene.

Bei all diesen qualitativen und quantitativen Experimenten stellt sich allerdings die Frage der Performanz bzw. der Nähe zu den idealisierten Gesetzen. Um diese näher zu beleuchten, ermitteln und charakterisieren wir anhand der oben genannten Experimente die Einflüsse von Reibung, Elastizität sowie von Drehbewegungen. Konkret gehen wir den folgenden Fragen nach:

- Wie groß ist der Einfluss von Reibung auf die Bewegung der Scheiben?
- Wie elastisch sind „elastische“ Stöße zwischen zwei Scheiben verglichen mit der Luftkissenbahn?
- Wie kann man zweidimensionale Stöße mit Störeinflüssen sinnvoll auswerten (Berücksichtigung von Drehungen usw.)?

3. Aufbau und Auswertung der Experimente

Im Folgenden wird beschrieben wie die Experimente einfach und schultypisch durchgeführt und analysiert werden können.

3.1. Aufbau der Experimente

Alle Experimente werden auf einer Glasplatte (Sicherheitsglas!) ausgeführt, die auf zwei Tischen liegt (Abb.3). Die Videoaufzeichnung erfolgt von unten durch die Glasplatte. Hierzu eignet sich ein Smartphone mit Slow-Motion Aufnahmefunktion (hier 120 fps, 1080p).

Zur Ermittlung des Einflusses der Reibung auf die Bewegung der Scheiben wurden diese mit verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten in ihrer Bahn über die Glasplatte verfolgt und die Abnahme der Geschwindigkeit untersucht.



Abb.3: Versuchsaufbau mit Glasplatte zwischen zwei Tischplatten. Gefilmt wird von unten mit einem Smartphone.

Bei den Stoßexperimenten wurden Stoßprozesse mit Luftkissenscheiben für Vergleichsanalysen auf der Luftkissenbahn aufgenommen. Es wurden sowohl Stöße mit gleichen als auch mit unterschiedlichen Massen der Stoßpartner untersucht

Zur g -Bestimmung wird die Glasplatte auf einer Seite mit Holzklötzen angehoben, um eine schiefe Ebene zu realisieren (Abb.4).

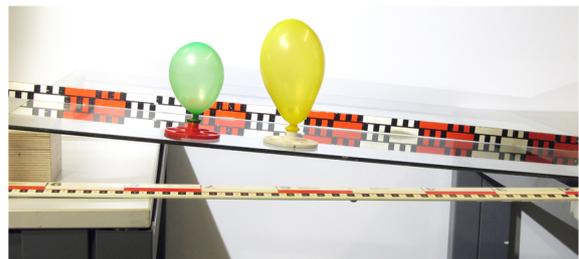


Abb.4: Versuchsaufbau zur g -Bestimmung an der schiefen Ebene.

3.2. Auswertung

Zur Auswertung wird das kostenlose Analyseprogramm ‚Tracker‘ [<http://physlets.org/tracker/>] verwendet. Mit Hilfe der Software können Bewegungsdaten wie Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie die Rotation ermittelt werden (s. z. B.

mögliche Experimente in Abschnitt 2.3). Die weitere Analyse der aufgenommenen Daten erfolgt in Excel.

3.3. Analysegenauigkeit und Abweichungen

Abweichungen beim Markieren von Punkten im Video führen während der Analyse auf zweifache Weise zu Unsicherheiten auf den ausgewerteten Daten: Erstens muss im Programm händisch ein Maßstab zum Umrechnen der Abstände von Pixeln in Längeneinheiten eingefügt werden, sodass sich die Unsicherheit beim Markieren der beiden Endpunkte des Maßstabs auf alle ausgelesenen Positionsdaten und die daraus abgeleiteten Größen überträgt. Durch Aufnahme von Videos mit hoher Auflösung und Markierung einer relativ langen Strecke als Maßstab kann dieser Fehler vernachlässigbar klein gehalten werden.

Zusätzlich zur Unsicherheit auf dem Maßstab ergibt sich beim Tracken der Scheiben bei jeder neu gesetzten Positionsmarkierung erneut eine Ortsunsicherheit durch ungenaues Klicken. Die Größenordnung dieser Unsicherheit wurde ermittelt, indem in einem Standbild 50-mal versucht wurde, eine Markierung auf denselben Punkt im Zentrum der Luftkissenscheibe zu setzen. Die doppelte Standardabweichung der so ermittelten Positionsdaten ergab einen Wert von 0,25 Pixeln. Dieser Wert wurde für alle weiteren Daten als Unsicherheit der Positionsbestimmung angenommen.

4. Ergebnisse

Nachfolgend wird zunächst anhand des Experiments zur schiefen Ebene die Reibung der Scheiben beim Gleiten ermittelt. Daraufhin erfolgt die Betrachtung der Elastizität der Stöße samt möglicher Gründe für Abweichungen. Im Anschluss erfolgt ein Vergleich mit der Luftkissenbahn.

4.1. Einfluss der Reibung

Betrachtet man die Bewegung der Scheibe auf der Glasplatte, kommen im Wesentlichen zwei Reibungsvorgänge infrage, die einen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit haben können. Zum einen ist dies die Gleitreibung der Scheibe auf der Unterlage, bzw. auf dem zwischen Scheibe und Unterlage erzeugten Luftpolster. Da es sich hierbei um einen Reibungsvorgang zwischen Festkörper und einem Gas handelt, ist zu erwarten, dass die auftretenden Reibungskräfte im Allgemeinen abhängig von der Geschwindigkeit sind.

Zum anderen bietet vor allem der Ballon eine große Angriffsfläche für den Luftwiderstand. Die Kräfte, die aus der Relativbewegung von Scheibe und Ballon im umgebenden Medium Luft resultieren, sind ebenfalls nicht geschwindigkeitsunabhängig.

Darüber hinaus muss in der Praxis beachtet werden, dass die Größe des Ballons einen nicht hinreichend kontrollierbaren, zeitlich veränderlichen Parameter darstellt, der zusätzlichen Einfluss auf die resultierende Gesamtreibungskraft hat. Eine genaue mathematische Modellierung des erwartbaren Geschwindigkeitsverlaufs der Scheiben ist deshalb an dieser Stelle nicht möglich.

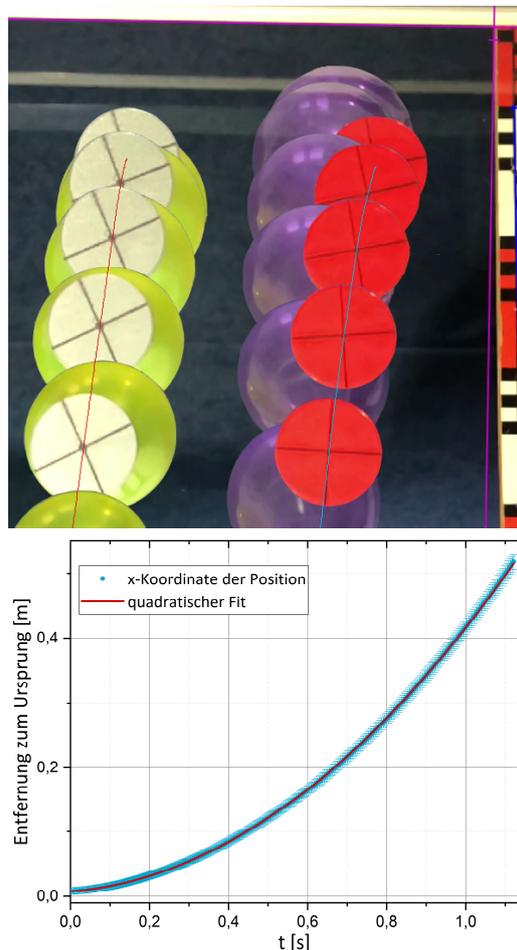


Abb.5: Analyse der g -Bestimmung an der schiefen Ebene. a.) Stroboskopaufnahme der Bewegung der Luftkissenscheiben. b.) Plot der mit Tracker aufgenommenen Bahnkurve. Es wurde die Bewegung der Scheibe in Richtung Gefälle als Funktion der Zeit aufgetragen.

In unseren Versuchen konnte bei Betrachtung längerer Zeitskalen durchaus wie erwartet eine Abhängigkeit der Geschwindigkeitsänderung von der Anfangsgeschwindigkeit beobachtet werden. Da die hier präsentierten Einzelmessungen jedoch nur wenige Sekunden lang sind und die Geschwindigkeiten bewusst geringgehalten wurden, ist dieser Effekt allerdings kaum sichtbar.

Um dennoch eine für die Unterrichtspraxis relevante Aussage über den Einfluss der Reibung treffen zu können, wurde die Abweichung des gemessenen Wertes für g an der schiefen Ebene als Gütekriterium herangezogen:

Es wird erwartet, dass ohne Reibungsverluste der Wert für die Erdbeschleunigung mit der Methode der schiefen Ebene recht exakt bestimmt werden könnte. Da jedoch in der Realität immer Reibungskräfte auftreten, die als Gegenkraft zur Hangabtriebskraft in Erscheinung treten, sollte die experimentell ermittelte Beschleunigung an der schiefen Ebene geringer sein als der Literaturwert von $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$. Die Abweichung vom Literaturwert kann daher als Maß für die Größe der auftretenden Reibungskräfte im Bereich kleiner Geschwindigkeiten gelten. In Abb. 5 ist ein typisches Stroboskopbild der Bahnkurve samt Messwerten dargestellt.

Zur Bestimmung der Beschleunigung wurde die Orts-Zeitkurve aufgenommen und mit einer quadratischen Modellfunktion gefittet. Aus dem Streckfaktor der Parabel lässt sich dann über die Winkelbeziehungen im Kräfteparallelogramm die Erdbeschleunigung ermitteln:

$$g = \frac{a_{gemessen}}{\sin \alpha} \quad \{1\}$$

Der Winkel α bezeichnet dabei den Anstellwinkel der Ebene.

Im Mittel ergab sich bei den 16 ausgewerteten Durchläufen ein Wert von $g \approx 9,4 \frac{m}{s^2}$, also eine Abweichung vom Literaturwert im Bereich von ca. 5%. Die mittlere Abweichung der Messdaten vom Mittelwert betrug $\Delta g = 0,44 \frac{m}{s^2}$. Der Einfluss der Reibung ist somit unserer Ansicht nach bei geringen Geschwindigkeiten der Scheiben in den Experimenten als gering einzuschätzen (vgl. auch Abschnitt 4.4)

4.2. Elastizität der Stöße

Wenn Luftkissenscheiben im Unterricht eine sinnvolle Alternative zur Luftkissenbahn darstellen sollen, ist eine zentrale Frage, in welchem Umfang der Gesamtimpuls bei Stößen zwischen zwei Scheiben tatsächlich erhalten bleibt. Um dieser Frage nachzugehen wurden insgesamt 60 Stöße von Luftkissenscheiben analysiert, davon 30 Stöße zwischen zwei Scheiben annähernd gleicher Masse und 30 Stöße, bei denen die Masse einer Scheibe durch zusätzliche Gewichtsstücke auf das Dreifache erhöht wurde.

Stoßpartner mit gleichen Massen

Die Abbildung 6 zeigt neben einer Stroboskopaufnahme der Scheibenbahnen einen typischen Geschwindigkeitsverlauf für einen Stoß zwischen zwei Scheiben gleicher Masse (blaue und graue Datenpunkte). Zudem ist der zeitliche Verlauf des Gesamtimpulses auf einer separaten Achse dargestellt (grüne Datenpunkte).

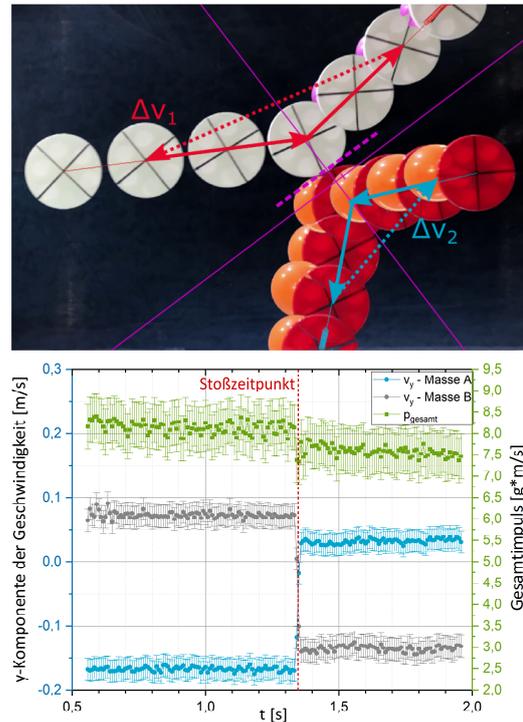


Abb.6: Analyse eines Stoßes bei gleicher Massenverteilung. a.) Stroboskopaufnahme der Bewegung der Luftkissenscheiben. b.) Plot der mit Tracker ermittelten Geschwindigkeits- und Impulsdaten. Deutlich zu sehen ist, dass bezogen auf die y-Achse die Scheiben ihre Geschwindigkeiten „tauschen“

Da in den Geschwindigkeits-Zeit Diagrammen aufgrund verschiedener Prozesse teilweise deutliche Schwankungen auftreten können (z. B. durch die Übertragung von Schwingungen des Ballons), wurde zur Auswertung der Daten folgendermaßen vorgegangen: Zunächst wurde der Zeitpunkt des Stoßes als der zum Datenpunkt des minimalen Gesamtimpulses gehörige Zeitwert ermittelt. Von diesem Zeitpunkt ausgehend wurde der Gesamtimpuls vor und nach dem Stoß $\vec{p}_{ges,vor}$ und $\vec{p}_{ges,nach}$ durch Mittelung über je 20 Datenpunkte bestimmt. Rund um den in Abbildung 6b zu sehenden Stoßzeitpunkt wurden je 10 Datenpunkte vor und nach dem Stoß nicht zur Berechnung des Mittelwerts herangezogen. Als Kenngröße für die Änderung des Gesamtimpulses wurde schließlich die relative Änderung des Gesamtimpulses berechnet:

$$\Delta \vec{p}_{ges} = \frac{\vec{p}_{ges,nach}}{\vec{p}_{ges,vor}} \quad \{2\}$$

Für zwei Scheiben gleicher Massen ergab sich in den 30 ausgewerteten Stößen eine mittlere Abnahme des Gesamtimpulses von etwa 20%. Bei weiteren Analysen der Aufnahmen zeigt sich aber, dass diese 20% Impulsverlust nicht komplett einem inelasti-

schen Anteil des Stoßprozesses zuzuschreiben sind. Teilweise rotieren die Scheiben vor und/oder nach dem Stoß um ihre Mittelachse und tragen somit einen Drehimpuls, dessen Änderung beim Stoß in der Gesamtbilanz berücksichtigt werden muss. (Abb. 7a). Auch solche Effekte lassen sich prinzipiell über die Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit quantitativ auswerten (Abb. 7b), sollen hier aber nicht näher betrachtet werden, da eine umfassende Betrachtung von Drehimpulsen und Trägheitsmomenten über das übliche Schulniveau hinausgeht.

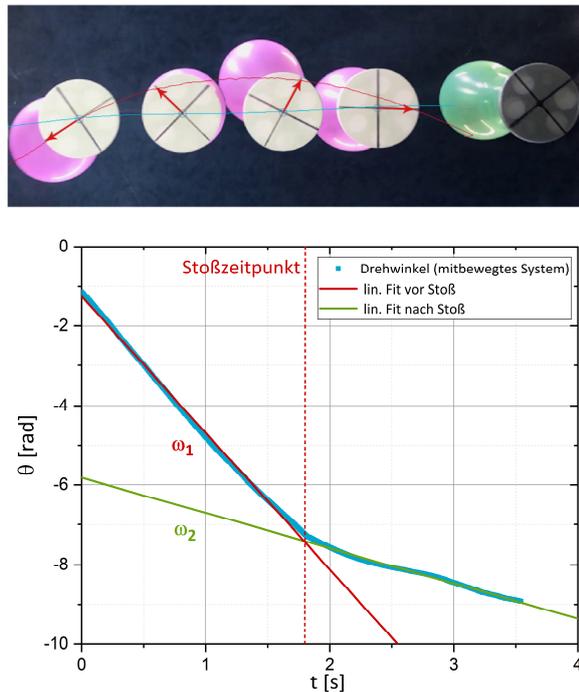


Abb.7: Analyse der Rotation der Scheibe. Die rotierende weiße Scheibe trifft auf die ruhende graue Scheibe. a.) Stroboskopaufnahme der Bewegung der Luftkissenscheiben b.) Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit vor und nach dem Stoß über die zeitliche Änderung des Drehwinkels.

Stoßpartner mit unterschiedlichen Massen.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde eine der Scheiben zusätzlich mit zwei M12-Muttern beschwert, sodass zwischen leichter und schwerer Scheibe ein Massenverhältnis von etwa 3:1 bestand. Ein typischer Stoß samt Analysedaten ist in Abbildung 8 zu sehen. Die Auswertung von 30 Stößen ergab mit einer mittleren Abnahme des Gesamtimpulses von ca. 35% ein deutlich größeres Defizit in der Impulsbilanz, als dies bei gleichen Massen der Fall war. Dies lässt sich auf die im folgenden Abschnitt erwähnten Effekte zurückführen.

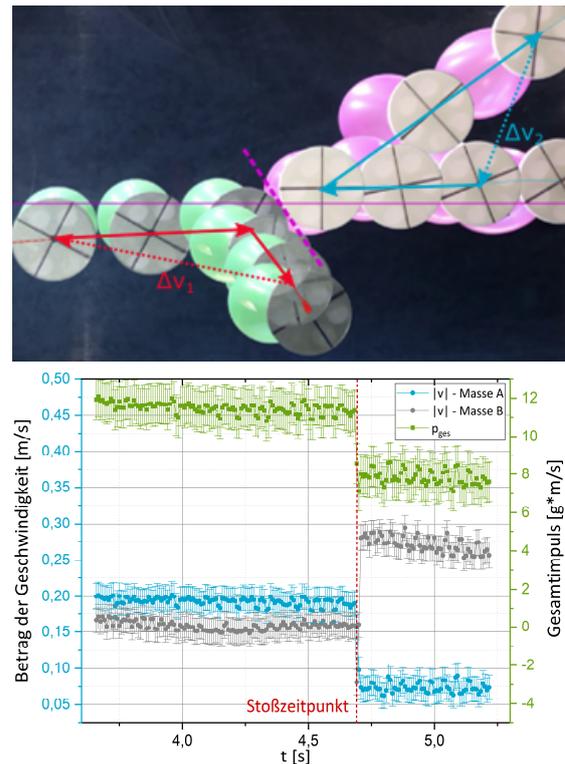


Abb.8 Analyse eines Stoßes bei ungleicher Massenverteilung. a.) Stroboskopaufnahme der Bewegung der Luftkissenscheiben. b.) Plot der mit Tracker ermittelten Geschwindigkeits- und Impulsdaten. Die leichte Scheibe hat nach dem Stoß die deutlich höhere Gesamtgeschwindigkeit.

4.3. Abweichungen von idealisierter Theorie

Anhand der Videoaufnahmen sowie der Daten aus Tracker lassen sich verschiedene Gründe für Abweichungen von der Theorie des idealen Stoßes ermitteln. Diese entstehen u.a. durch:

- Abreißen des Luftpolsters durch Kippen der Scheibe beim Stoß.
- Luftreibung am Ballon und Gleitreibung auf der Unterlage (Abschnitt 4.1).
- Zusätzlichen Beitrag von Rotationsenergie, bzw. Drehimpuls (Abb. 7a, Abschnitt 4.2).
- Schwingungen des Ballons (Abb. 7a).
- perspektivische (Winkel-)Verzerrungen der Kameraaufnahme sowie der unterschiedlichen Position von Luftkissenscheibe und Referenzmaß (insbesondere an der schiefen Ebene).

Durch Verwendung größerer Massen und den damit einhergehenden größeren Kräften beim Stoß werden vor allem die ersten drei Effekte verstärkt, was die beobachtete größere Abnahme des Impulses erklärt.

5. Vergleich mit der Luftkissenbahn

Um einen Vergleichswert für die bisher ermittelten Kenndaten der Luftkissenscheiben zu ermitteln wurden die oben beschriebenen Versuche auch an einer Luftkissenbahn durchgeführt. Auch hier wurden 16 Messreihen an der schiefen Ebene, bzw. je 30 Stöße mit gleicher und ungleicher Massenverteilung (hier aufgrund der generell größeren Massen: $m_1 \approx 2m_2$) per Video aufgenommen und in Tracker analysiert.

Der an der schiefen Ebene ermittelte Wert für die Erdbeschleunigung ergab ebenfalls einen Wert von $g \approx 9,4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, jedoch weisen die Werte der Einzelmessungen eine deutlich geringere Streuung auf ($\Delta g = 0,18 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$). Die mittlere Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert ist damit bei der Luftkissenbahn nur etwa halb so groß wie bei den Messwerten der Luftkissenscheiben.

Dies lässt darauf schließen, dass Störparameter auf der Luftkissenbahn deutlich besser konstant gehalten werden können als beim Einsatz von Luftkissenscheiben, wo sich z. B. Größe des Ballons und Druck der ausströmenden Luft ständig ändern. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Luftkissenscheiben in puncto Reibung ähnlich gut funktionieren wie die teure Luftkissenbahn. In beiden Experimentiersettings kann der Einfluss Reibung auf die Bewegung aufgrund der geringen Abweichung um 5% vom Literaturwert als gering eingeschätzt werden.

Bei elastischen Stößen zwischen zwei gleich großen Massen zeigten sich an der Luftkissenbahn deutlich geringere Verluste als bei den Luftkissenscheiben. Im Mittel betrug die Impulsabnahme durch den Stoß etwa 6%, und somit grob ein Drittel der an den Luftkissenscheiben gemessenen Abnahme. Dies ist insbesondere auf das bei der Luftkissenbahn eingesetzte Gummisystem zur Federung zurückzuführen, während bei den Scheiben allein die Elastizität des Kunststoffmaterials selbst entscheidend ist.

Ein anderes Bild ergab sich jedoch bei der Analyse der Stöße mit ungleicher Massenverteilung. Hier betrug die relative Abnahme des Gesamtimpulses im Mittel 28% und liegt damit nur wenige Prozent unter den Luftkissenscheiben. Sicherlich ließe sich hier die Performanz der Luftkissenbahn verbessern, indem z. B. ein System mit metallener Blattfeder anstelle des hier benutzten Gummisystems verwendet würde.

Die Ergebnisse zeigen, dass die auftretenden Verluste durch Stoß und Reibung bei der Luftkissenbahn insgesamt zwar geringer ausfallen als bei den Luftkissenscheiben. Es zeigt sich aber gleichzeitig auch, dass selbst unter den sehr guten idealisierenden Experimentierbedingungen, die die Luftkissenbahn bietet, noch eine deutliche Abnahme des Gesamtimpulses zu verzeichnen ist.

6. Fazit

Mit Hilfe von Luftkissenscheiben können im Unterricht realistische Experimente zur Kinematik umgesetzt werden. Unsere Experimente zeigen, dass diese für die schulische Betrachtung verglichen mit der Luftkissenbahn zufriedenstellende quantitative Ergebnisse liefern können. Die Komplexität der verschiedenen Einflüsse kann hierbei als Chance zum Umgang mit idealisierten Theorien und Modellen gesehen werden. Durch den günstigen Herstellungspreis können vor allem als Schülerexperimente eine Vielzahl von Experimenten auf unterschiedlichen Komplexitätsniveaus qualitativ oder quantitativ durchgeführt werden.

7. Literatur

- [1] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2008): Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen. https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaen/upload/lehrplaene_download/gymnasium_g8/gym8_physik.pdf (10.05.2019).
- [2] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2014): Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaen/upload/klp_SII/ph/KLP_GOSt_Physik.pdf (10.05.2019).
- [3] Wilhelm, Thomas, Heuer, Dieter (2002): Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden – durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung. In: PdN – Physik in der Schule, 51/7, S. 29-34.
- [4] Wilhelm, Thomas (2008): Mechanik – zweidimensional und multimedial. In: Didaktik der Physik, hrsg. v. Volker Nordmeier und Helmut Grötzebauch, Berlin: Lehmanns Media.
- [5] Kugler, Heike, Lichtenstern, Hedwig (Hrsg.) (2019): Naturwissenschaften im Unterricht Physik, Heft 169: Materialien und Methoden: Einfache Maschinen. Seelze: Friedrich Verlag.
- [6] Schecker, Horst, Wilhelm, Thomas Hopf, Martin, Duit, Reinders. (Hrsg.) (2018): Schülervorstellungen und Physikunterricht. Berlin: Springer Verlag.
- [7] Tobias, Verena, Waltner, Christine, Hopf, Martin, Wilhelm, Thomas, Wiesner, Hartmut (2010): Dynamischer Mechanikunterricht – Ergebnisse einer quantitativen Vergleichsstudie. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Hannover 2010, hrsg. v. Volker Nordmeier und Helmut Grötzebauch. <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/111/130> (20.05.2019).
- [8] Müller, Kai, Müller Rudolf (2017): Mechanik pur - Luftkissen-Experimente ohne Kompressor. In: MNU-Journal 70 (3), S. 169-17.

- [9] Straulino, Samuele & Bonechi, Lorenzo (2011): A Simple Frictionless Device for the Study of Motion. In: Physics Education, 46/5 S.583-586.
- [10] Wilhelm, Thomas & Stein, Jacqueline (2018): Experimente mit Luftkissenpucks. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Dresden 2018, hrsg. v. Volker Nordmeier und Helmuth Grötzebauch, S. 459 – 465.
<http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/824/970> (20.05.2019).
- [11] Pusch, Alexander & Bruns, Carsten (2018): Von der Idee zum Produkt - Experimente aus dem 3D-Drucker. In: Mathematisch naturwissenschaftlicher Unterricht (MNU), 71/1, S. 14-19.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Tabea Mann und Bianca Niedermeier für die Unterstützung bei Aufnahme und Tracking der Videodaten.