

Experimente mit Luftkissenpucks

Thomas Wilhelm; Jacqueline Stein

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt
wilhelm@physik.uni-frankfurt.de; Jacqueline.Stein@gmx.net

Kurzfassung

Besonders am Anfang des Physikunterrichts werden bestimmte Einflüsse ausgeblendet, um reine Phänomene zu betrachten – im Falle der Mechanik ist dies die Reibung. Allerdings sind Luftkissenfahrbahnen und Luftkissentische teuer und der Inbegriff von Lebensferne. Luftkissenpucks sind dagegen ein günstiges und faszinierendes Spielzeug. Insbesondere für zweidimensionale Bewegungen bietet sich die Messwerterfassung mittels Videoanalyse an.

Auf ebener Unterlage können Stöße verschiedener Pucks betrachtet werden: Stöße auf einen ruhenden oder bewegten Puck mit gleicher oder unterschiedlicher Masse, Stöße eines Pucks mit der Wand oder vollkommen unelastische Stöße, indem ein Puck mit doppelseitigem Klebeband beklebt wird. Auf einer schiefen Unterlage sind Modelle eines waagrechten und eines schiefen Wurfes möglich. Mit entsprechenden Befestigungen in der Mitte sind Kreisbewegungen und Spiralbewegungen möglich.

1. Motivation und frühere Varianten

Im Physikunterricht werden besonders zu Beginn der Behandlung eines Themas bestimmte Einflüsse ausgeblendet, um reine Phänomene zu betrachten. In der Mechanik ist dieser Einfluss die Reibung. Dieses Bemühen, bei Bewegungen die Reibung stark zu verringern, führte zur Entwicklung von verschiedenen Luftkissen-Experimentiergeräten. Nach Heffner und Wilke [1] muss man lineare Anordnungen und flächenförmige Anordnungen unterscheiden. Außerdem gibt es für die Erzeugung des Luftpolsters nach Heffner und Wilke [1] zwei Möglichkeiten, da es entweder vom Schwebekörper oder von der Unterlage erzeugt wird, wobei das Letztere aufwändiger ist. Von der Unterlage wird das Luftkissen bei Luftkissenfahrbahnen und bei Luftkissentischen [1-5] erzeugt. Insbesondere die Luftkissenfahrbahnen wurden zum Standardgerät im Mechanikunterricht und zum Inbegriff der Lebensferne des Physikunterrichts. Außerdem wissen wir heute, dass die Konzentration auf geradlinige Bewegungen Fehlvorstellungen fördert und erzeugt. Ferner sind Luftkissenfahrbahnen und Luftkissentische störend laut und teuer – sieht man von selbst gebauten Luftkissentischen [3+6] ab.

So ist es naheliegend, Luftkissenpucks zu verwenden, die sich ihr Luftkissen selbst erzeugen. Eine alte Idee ist, dafür kleine Scheiben zu verwenden, in deren Mitte ein aufgeblasener Luftballon befestigt wird, dessen Luft unter der Scheibe ausströmt [1]. Solche Plastikscheiben waren früher im Stark-Verlag zu kaufen [7] (siehe Abb. 1). Mit ihnen konnte auf einer ebenen, glatten und waagerechten Fläche eine reibungsfreie Bewegung beobachtet werden. Weitere Versuche waren kaum möglich, da die

Pucks zu leicht waren. Da der Schwerpunkt des Ballons nie genau über dem Mittelpunkt des Luftkissengleiters wurde ein kleiner seitlicher Schub hervorgerufen.



Abb. 1: Einfachste Luftkissengleiter

Entsprechend gab es Vorschläge, solche Scheiben etwas größer aus Aluminium zu fertigen [8+9]. Dazu wird allerdings eine Drehmaschine benötigt sowie fachkundige Bedienkenntnisse. Pusch und Bruns haben deshalb vorgeschlagen, solche Scheiben mit Hilfe eines 3D-Druckers herzustellen [10].

Besser ist es, wenn der Luftkissengleiter das Luftkissen mit einem Gebläse erzeugt. Ein aufwändiger Bau eines Luftkissenpucks wurde schon 1978 vorgeschlagen [1]. 1987 wurde der Selbstbau eines propellergetriebenen Luftkissenfahrzeuges beschrieben, das mit einem Gleichstrom-Minimotor betrieben wird [11]. Eine moderne Bauanleitung eines Luftkissengleiters mit Hilfe einer Polystyrolschale, einem Müllsack und einem Gleichstrommotoren beschreiben Pürmayr, Wolny und Hopf [12]. Daneben gibt es auch Bauanleitungen für Luftkissengleiter, auf denen eine Person sitzen kann [13-14] und sogar

fertig kaufbare Luftkissengleiter für eine Person [15].

Für Experimente im Physikunterricht sind auf jeden Fall Luftkissenpucks am geeignetsten [16-18]. Diese gibt es manchmal in Spielzeugläden oder Supermärkten günstig zu kaufen oder sie sind bei Lehrmittelherstellern zu erwerben [17] (siehe Abb. 2). Dabei handelt es sich um ein sehr robustes und faszinierendes Spielzeug. In diesem Artikel soll es nur um solche käuflich erwerbaren Luftkissenpucks gehen. Sie haben mehrere Akkus in sich und ein Gebläse, das die Luft durch ein kleines Loch in der Oberseite ansaugt und gleichmäßig nach unten ausströmen lässt. Außen herum haben sie einen weichen Schaumstoffrand, so dass sie sich gut für Stöße eignen.



Abb. 2: Luftkissenpucks: Links von einer Lehrmittelfirma [17] und rechts aus dem Supermarkt

Bei den Versuchen wurden zwei unterschiedliche Arten von Luftkissenpucks verwendet. Zum einen war dies ein kleines No-Name-Modell, welches von der Firma Pearl.GmbH vertrieben wird (Preis 12,90 €). Es hatte einen Durchmesser von 9,2 cm und eine Masse von 68,7 g. Zum anderen wurden zwei Pucks der Firma 4Kidz verwendet, die u.a. von der Lehrmittelfirma Conatex vertrieben wurden und mit herkömmlichen AA-Batterien betrieben werden können. Mit neuwertigen Akkus mit einer Ladung von 2400 mAh konnten die Pucks im Dauerbetrieb ohne Probleme zwei Stunden laufen. Die Pucks hatten einen Durchmesser von 18 cm und eine Masse 304 g bzw. 306 g. Um für die Versuche unterschiedliche Massen der Pucks zu haben, wurde ermittelt, wie viel Zusatzmasse an diesen befestigt werden konnte, ohne dass es zu einem Schleifen der Pucks auf dem Untergrund kommt. Bei voller Akkuladung konnte ein Puck mit zusätzlich 284 g ausgestattet werden. Dafür wurden 10 g-Massestücke an der Unterseite des Pucks festgeklebt und 50 g-Massestücke mithilfe von Knete auf der Oberseite befestigt, so dass das Endgewicht bei 590 g lag.

2. Qualitative Freihandversuche

Lässt man einen Luftkissenpuck senkrecht auf eine feste Wand gleiten, kommt er mit gleichem Tempo

wieder zurück (Impulserhaltung). Trifft er unter einem schrägen Winkel auf die Wand, gilt Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel (siehe Abb. 3), was beim Billard genutzt wird. Zusätzlich kann man nach dem Stoß eine Rotation sehen (siehe Abb. 4), die vorher nicht da war, was an einer tangentialen Kraft von der Wand auf den Puck liegt. Dieser Vorgang wird in [19] zur Einführung der Reibung als tangentiale Kräfte verwendet.

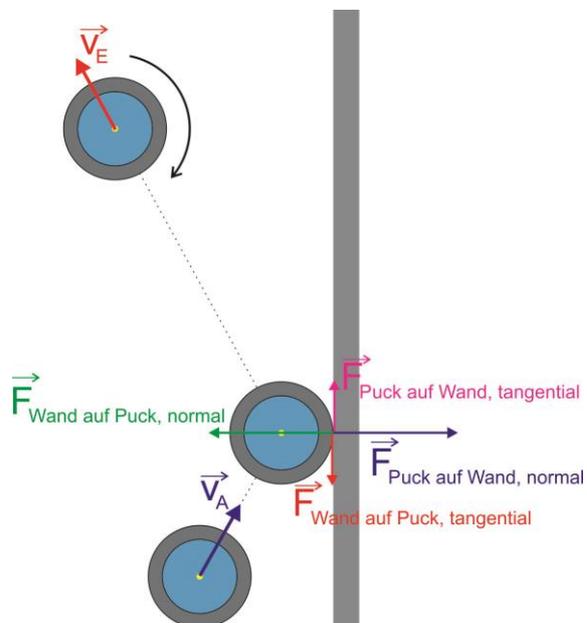


Abb. 3: Kräfte beim Stoß eines Pucks auf die Wand (nach [19])

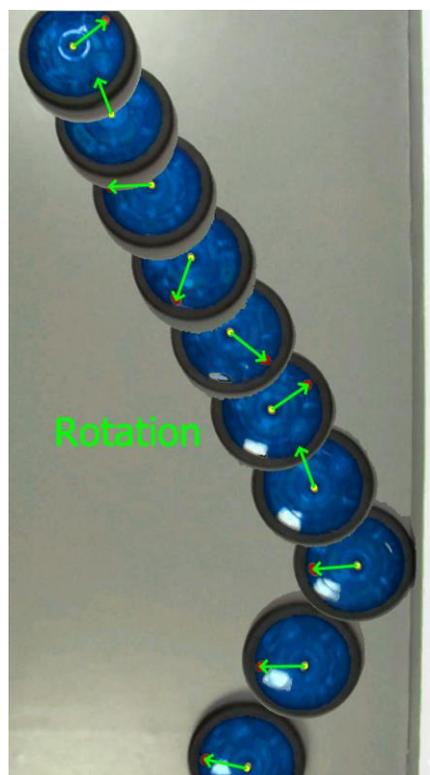


Abb. 4: Bewegung beim Stoß eines Pucks auf die Wand (nach [19]), erzeugt mit measure dynamics

In dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept von Wiesner, Wilhelm, Hopf, Waltner und Tobias zur Einführung in die Mechanik in der Sekundarstufe I [20] spielt der senkrechte Stoß auf eine Kugel eine große Rolle: Eine Kugel kommt von links angerollt und es wird senkrecht zur Bewegungsrichtung auf die Kugel gestoßen. Schülerinnen und Schüler erwarten dann häufig, dass die Kugel danach in die Stoßrichtung weiterrollt, also die einwirkende Kraft die Geschwindigkeitsrichtung bestimmt. Sie erkennen aber, dass die Bewegung schräg abläuft und es wird ihnen mitgeteilt, dass tatsächlich wie erwartet eine Geschwindigkeit in Richtung der Einwirkung dazukam, aber die Anfangsgeschwindigkeit auch noch da ist und beide zusammen die Endgeschwindigkeit bestimmen. Problematisch daran ist die Frage, welchen Einfluss die Rotation der Kugel hat, weshalb Luftkissenpucks dazu besser geeignet sind. Sie können mit kleiner oder großer Anfangsgeschwindigkeit auf dem Boden ankommen und werden leicht oder fest mit einem Holz gestoßen (oder kurz mit dem Fuß getreten). Auch Stöße schräg zur Bewegungsrichtung sind möglich (siehe Abb. 5).

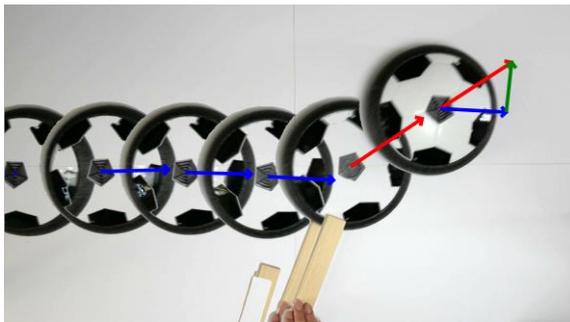


Abb. 5: Schräger Stoß auf einen Puck (blau: Anfangsgeschwindigkeit, rot: Endgeschwindigkeit, grün: Geschwindigkeitsänderung = Zusatzgeschwindigkeit durch Stoß)

3. Quantitative Messmöglichkeiten

Man kann auf einem Luftkissengleiter eine Schnur befestigen und diese über ein Bewegungsmesslaufwerk laufen lassen, um so die Bewegung zu erfassen. Dies geht aber nur bei geradlinigen Bewegungen. Auch Ultraschallsensoren oder Lasermessgeräte eignen sich nur für geradlinige Bewegungen.

Man könnte sich auch vorstellen, auf einen Luftkissengleiter einen 3D-Beschleunigungssensor zu befestigen, der seine Daten per Funk an einen PC sendet [21]. Entsprechende Sensoren von Lehrmittelfirmen sind aber zu groß, um sie auf dem Gleiter befestigen zu können.

Insbesondere für zweidimensionale Bewegungen gibt es noch die Möglichkeit, Stroboskopbilder zu erzeugen, z.B. mit der Freeware-Software „Live Video Strobe“ [22], der App „Motion Shot“ oder dem Videoanalyseprogramm „measure dynamics“.

Die meisten Möglichkeiten ergeben sich mittels Videoanalyse. Dabei kann der Puck als Ganzes oder

ein aufgeklebter Punkt verfolgt werden. Je nach Videoanalysesoftware können in das Video auch Pfeile für die physikalischen Größen eingezeichnet werden oder aus dem Video Stroboskopbilder oder Stroboskopfilme [23] erzeugt werden. Alle Beispiele in diesem Artikel wurden mit „measure dynamics“ aufgenommen. Hilfreich sind dazu eine helle, einfarbige Grundfläche, ein Fotostativ und eine Lampe (siehe Abb. 6). Alle Versuche wurden auf einer Holzplatte mit den Maßen 1,2 m mal 0,8 m durchgeführt, welche mit einer Wasserwaage justiert wurde und mit einem weißen Papier abgedeckt wurde.



Abb. 6: Aufbau für die Videoanalyse der Bewegungen des Luftkissenpucks

4. Beispiele für Experimente mit Luftkissenpucks mit Videoanalyse

Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt darauf zu zeigen, wie mit der Videoanalyse die Versuche mit den Spielzeug-Luftkissenpucks ausgewertet werden können. Eine detailliertere Darstellung findet sich in [17].

4.1. Zentralkräfte

Für die Analyse einer Kreisbewegung wurde eine Schraube, die durch ein Teilgewinde über einen glatten Schaft verfügte, auf der Holzplatte mittig positioniert. Als Verbindungsschnur zum Luftkissenpuck wurde ein Perlon-Draht genommen, da dieser über gute Gleiteigenschaften verfügt. Der Draht wurde mit einem Palstek-Knoten zu einer Schlinge geformt, da diese sehr haltbar ist und sich bei Belastung nicht zusammenzieht. So ist ein freies Drehen des Pucks gewährleistet. Oben im Gebläse des Pucks der Lehrmittelfirma [17] wurde ein kurzer stabiler Stab befestigt. Da in der oberen Ansaugfläche des Pucks ein Netzmuster vorhanden war, wurde der Stab so gewählt, dass er genau in das mittlere

Loch passte. Der Luftstrom wird dadurch kaum beeinflusst. Der Stab auf dem Puck und die Schraube auf der Holzplatte erreichten die gleiche Höhe, so dass die Perlon-Draht nirgends entlangschleifte.

Um die komplette Kreisbewegung aufzuzeichnen, muss die Kamera dementsprechend hoch positioniert werden, z.B. unter der Decke. Die Länge der Verbindungsschnur lag bei 20 cm. In measure dynamics können nun verschiedene Größen berechnet und dynamisch in das Video eingezeichnet werden. Ein Geschwindigkeitsvektor hat immer die gleiche Länge, ändert aber ständig seine Richtung. Aus aktuellem und vergangenen Geschwindigkeitsvektor entsteht der Geschwindigkeitsänderungsvektor, mit dem die Beschleunigung eingeführt werden kann. Abbildung 7 zeigt ein Stroboskopbild mit dem Beschleunigungsvektor. Da die Reibung klein ist, zeigt er fast genau zur Mitte und hat fast eine konstante Länge. Hierzu wurden für die Analyse eine Schrittweite von 5 (bei 29,98 fps) eingestellt, d.h. nur jedes fünfte Bild im Zeitabstand von 0,1668 s wird verwendet. Da das Tempo geringfügig abnimmt, nimmt auch die Länge des Beschleunigungsvektors etwas ab.



Abb. 7: Beschleunigung eines Luftkissenpucks bei einer Kreisbewegung

Für eine Variante wurde die Schraube entfernt und der Perlon-Draht durch das Loch in der Mitte der Holzplatte genutzt. Ans Drahtende wurde ein Gewichtstück der Masse 50 g befestigt, das auf den Puck eine konstante Zentralkraft ausübt. Nach dem Anstoßen des Pucks verändert sich der Radius und theoretisch müsste eine Rosettenbahn entstehen mit konstanter Beschleunigung zum Mittelpunkt. Die Verbindungsschnur lag jedoch auf dem Puck auf und schliff am Schaumstoff der Umrandung, so dass eine Reibungskraft vorhanden war. In Abbildung 8 ist deshalb zu erkennen, dass die Beschleunigung eine Komponente gegen die Bewegungsrichtung hat und ihr Betrag nicht konstant ist.

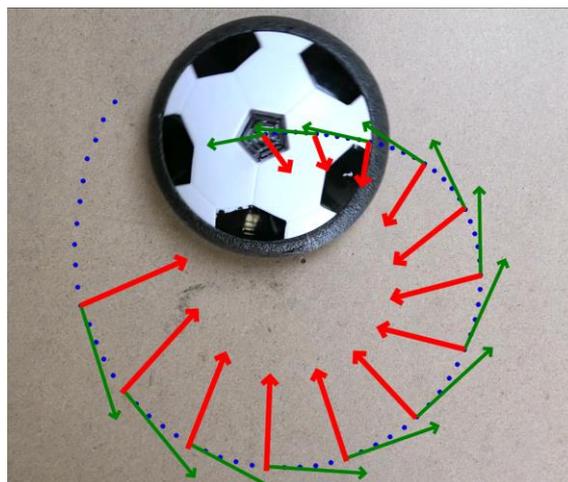


Abb. 8: Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Luftkissenpucks bei einer Bewegung mit konstanter Zentralkraft und Reibung.

4.2. Simulation von Würfeln

Mit den Luftkissenpucks können auch Wurfbewegungen simuliert werden, denn bei Wurfbewegungen ohne Luftreibung ist bei geeigneter Wahl des Koordinatensystems eine Beschleunigungskomponente null und die andere konstant ungleich null. Ohne Luftreibung können die Komponenten unabhängig voneinander betrachtet werden (Superpositionsprinzip), mit Luftreibung gilt das nicht mehr [24].

Dazu wird die Holzplatte zu einer schiefen Ebene umgebaut, indem auf einer Seite ein 5 cm hoher Holzblock unterlegt wurde, was einen Winkel von ca. 2,5° ergab, und die Kameraposition der Neigung der Platte angepasst wurde. Um einen waagerechten Wurf zu simulieren, muss der Puck senkrecht zum Gefälle angestoßen werden. Im Stroboskopbild der Abbildung 9 ist zu erkennen, dass sich die x-Komponente der Geschwindigkeit (blau) nicht ändert, während die y-Komponente der Geschwindigkeit (grün) gleichmäßig zunimmt. In [19] wird das so dargestellt, dass zur Anfangsgeschwindigkeit (blau) eine Zusatzgeschwindigkeit (grün) dazu kommt, was die Endgeschwindigkeit (rot) ergibt.

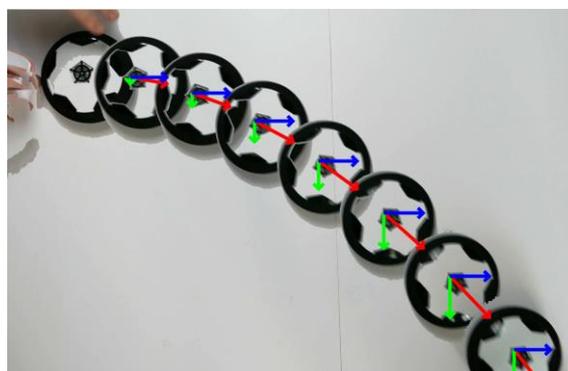


Abb. 9: Simulation eines waagerechten Wurfes (rot: Geschwindigkeit, blau: x-Komponente, grün: y-Komponente)

Möglich wäre hier noch, sich verschiedene Diagramme anzuschauen. Das t - x -Diagramm ist eine steigende Gerade, das t - y -Diagramm eine nach unten offene Parabel und die Bahnkurve (x - y -Diagramm) auch eine nach unten geöffnete Parabel. Gibt man eine entsprechende Funktion mit dem Parameter a_y ein, kann man den Parameter über einen Schieberegler so verstellen, bis die berechnete Kurve in Übereinstimmung mit der gemessenen ist [25, S. 57 ff.]. Hier wurde eine Beschleunigung von $a_y = 0,435 \text{ m/s}^2$ bestimmt.

Auch ein schräger Wurf kann simuliert werden, indem er Puck in einem Winkel die schiefe Ebene hoch gestoßen wird. Abbildung 10 zeigt ein Stroboskopbild einer solchen Bewegung. Wieder ist zu erkennen, dass sich die x -Komponente der Geschwindigkeit (blau) nicht ändert, während sich die y -Komponente der Geschwindigkeit (grün) gleichmäßig ändert, d.h. erst abnimmt und dann in entgegengesetzte Richtung zunimmt.

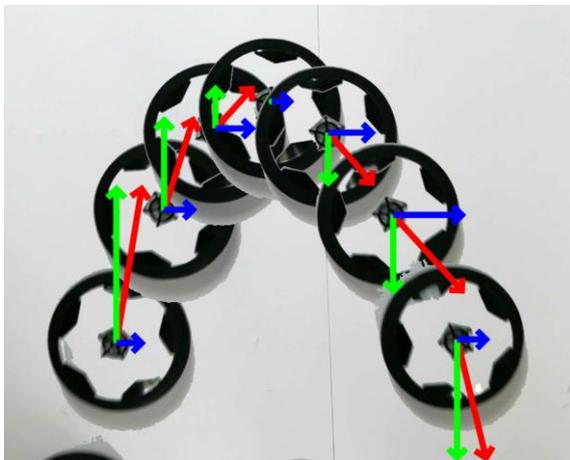


Abb. 10: Simulation eines schiefen Wurfs (rot: Geschwindigkeit, blau: x -Komponente, grün: y -Komponente)

4.3. Elastische Stöße

Des Weiteren können unterschiedliche Stöße zwischen zwei Pucks betrachtet werden. Möglich ist, dass ein bewegter Puck auf einen ruhenden oder einen ebenfalls bewegten Puck stößt. Möglich ist, zwei gleiche Pucks zu verwenden, zwei Pucks mit unterschiedlicher Größe und Masse zu nehmen (siehe Abb. 2) oder einen Puck zusätzlich zu beschweren.

Besonders schön lassen sich nicht-zentrale Stöße zeigen, wobei der Stoßparameter leicht variiert werden kann. Das ist qualitativ interessant, kann aber auch quantitativ ausgewertet werden. Ein perfekt zentraler Stoß ist dagegen kaum möglich. Auch eine ganz kleine Anfangsbewegung ist kaum zu vermeiden.

Zunächst soll ein Puck ungefähr zentral auf einen gleichschweren, ruhenden Puck stoßen. Für die Abbildung 11 wurde das Koordinatensystem so gelegt, dass der erste Puck (blaue Werte) anfangs nur eine kleine Geschwindigkeit in y -Richtung hat.

Man erkennt schön, dass sich die x -Komponente der Geschwindigkeiten bei beiden Pucks gleich viel ändert, also der Impuls in x -Richtung erhalten bleibt. Da der Stoß nicht ganz zentral war, ist es aber nicht so wie erwartet, dass die Geschwindigkeiten ausgetauscht werden.

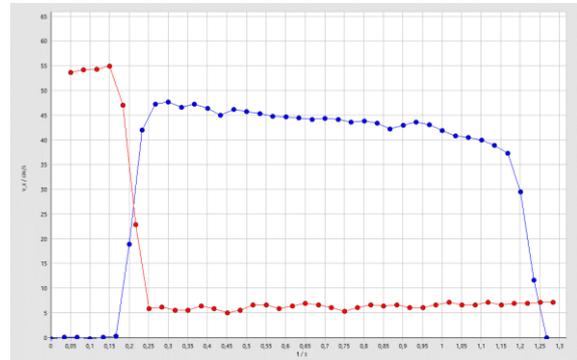


Abb. 11: x -Komponenten der Geschwindigkeit zweier gleich schwerer Pucks bei einem fast zentralen Stoß

Abbildung 12 zeigt, wie ein kleiner Puck (rot, 68 g) auf einen größeren (blau, 304 g) auftrifft, diesen anstößt und selbst in Gegenrichtung zurückgestoßen wird. Abbildung 13 zeigt, dass dabei Impulserhaltung gilt.

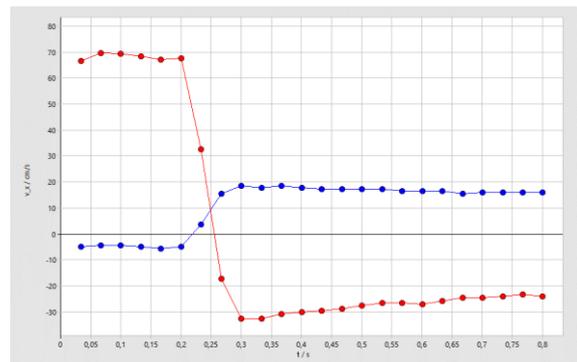


Abb. 12: x -Komponenten der Geschwindigkeit zweier Pucks bei einem fast zentralen Stoß: Ein leichter Puck (rot) stößt auf einen schweren Puck (blau).

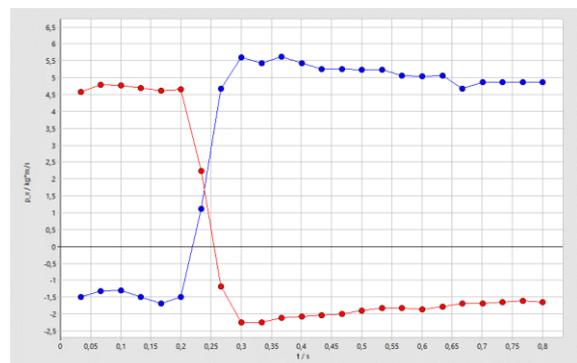


Abb. 13: x -Komponenten der Impulse zweier Pucks bei dem Stoß aus Abbildung 12.

Da das Diagramme-Interpretieren nicht einfach ist, ist es von Vorteil, wenn die physikalischen Größen, wie der Impuls als Pfeil in das Video eingezeichnet

werden können. In Abb. 14 ist dies für diesen Vorgang zu sehen.



Abb. 14: Ein leichter Puck stößt auf einen schweren Puck mit eingezeichneten Impulsfeilen.

Genaue Untersuchungen ergeben, dass bei den Stößen nur etwas kinetische Energie verloren geht, der Stoß also näherungsweise elastisch ist. Zu beobachten ist auch, dass die Pucks, die vor dem Stoß keine Drehung aufweisen, nach dem Stoß rotieren. Dies bedeutet, dass ein Teil der kinetischen Energie nach dem Stoß als Rotationsenergie vorliegt.

4.4. Unelastische Stöße

Mithilfe von doppelseitigem Klebeband, das jeweils an einer Seite der Pucks befestigt wurde, konnte neben den elastischen Stößen auch der vollkommen unelastische Stoß untersucht werden, bei welchem die Stoßpartner nach der Wechselwirkung eine gemeinsame Geschwindigkeit aufweisen. In Abbildung 15 ist der eine Puck fast in Ruhe. Da die Massen gleich sind, ergibt sich nach dem Stoß etwa die mittlere Geschwindigkeit.

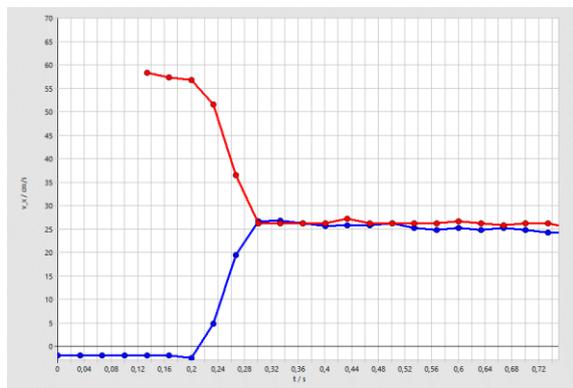


Abb. 15: x-Komponenten der Geschwindigkeit zweier gleicher Pucks bei einem fast zentralen unelastischen Stoß

5. Fazit

Luftkissenpucks sind faszinierende und preisgünstige Spielzeuge, die sich sowohl für qualitative wie auch für quantitative Experimente verwenden lassen. Für quantitative Auswertungen eignet sich die Videoanalyse von Bewegungen.

6. Literatur

[1] Heffner, J.; Wilke, H.-J. (1978): Luftkissen-Experimentiergeräte. In: Physik in der Schule, Heft 1-2, S. 50 – 61
 [2] Herlitz, P.; Widulla, U. (1981): Experimente auf dem großen Ealing-Luftkissentisch, In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Heft 2, S. 51 – 56

[3] Stöckel, H. (1990): Stoß zweier Scheiben. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Heft 8, S. 24 – 29
 [4] Kagan, D. T.; Klein, L. (2000): Why Is There No Vertex in Air-Table Collisions? In: The Physics Teacher 38, Heft 7, S. 414
 [5] Krämer, C. (2016): Experimente mit dem Luftkissentisch zur Einführung der Zusatzgeschwindigkeit. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 65, Heft 8, S. 32 – 36
 [6] Greenslade, T. B. (1997): A Small Air Table. In: The Physics Teacher 35, Heft 2, S. 116
 [7] Luftkissengleiter, Physik-Boutique, Stark-Verlag, Bestell-Nr. 11888
 [8] Straulino, S.; Bonechi, L. (2011): A simple frictionless device for the study of motion. In: Physics Education 46, Heft 5, S. 583 – 586
 [9] Müller, K.; Müller, R. (2017): Mechanik pur: Luftkissen-Experimente ohne Kompressor. In: MNU Journal 70, Heft 3, S. 169 – 171
 [10] Pusch, A.; Bruns, C. (2018): Von der Idee zum Produkt – Experimente aus dem 3D-Drucker. In: MNU Journal 71, Heft 1, S. 14 – 19
 [11] Laux, G. (1987): Das Luftkissenfahrzeug - Versuche mit einem Modell. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie 29, S. 30 – 33
 [12] Pürmayr, J. E.; Wolny, B.; Hopf, M. (2017): Low Cost 2D-Hover Puck, Proceedings Girep 2016, Krakau, Poland, [https://ucris.univie.ac.at/portal/en/publications/low-cost-2dhover-puck\(d301852d-7bbd-4a1e-83f4-55700993d7fb\).html](https://ucris.univie.ac.at/portal/en/publications/low-cost-2dhover-puck(d301852d-7bbd-4a1e-83f4-55700993d7fb).html)
 [13] Siemsen, F.; Deichmann, U. (1999): Und die Studentin schwebte ... – „Luftkissenfahrzeuge“, die Eingang in Unterricht und Arbeitsgemeinschaft finden können. In: Physik in der Schule, Heft 2, S. 96 – 98
 [14] Sperber, A.; Fiedler, F.; Heuper, W.; Trefzger, T. (2009): Gleitend zur Impulserhaltung - Versuche mit dem Luftkissengleiter. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Heft 6, S. 44 – 46
 [15] Hovercraft von Pasco: https://www.pasco.com/prodCatalog/ME/ME-9838_hovercraft/index.cfm
 [16] Carlson, J. E. (2004): Kick Dis Power Puck. In: The Physics Teacher 42, Heft 3, S. 144 – 45
 [17] Hover Puck von Pasco: https://www.pasco.com/prodCatalog/SE/SE-7335_hover-puck/index.cfm oder Luftkissengleiter von Conatex: https://www.conatex.com/catalog/physik_lehrmittel/mechanik/statik_krafte_dynamik/product-luftkissengleiter/sku-1041959#.Wn8HJuciGUK
 [18] Stein, J. (2017). Experimente mit Luftkissenpucks, Examensarbeit Goethe-Universität Frankfurt am Main. In: <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Luftkissenpucks.htm>

- [19] Wilhelm, T.; Wiesner, H.; Hopf, M.; Rachel, A. (2013): Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik, Reihe Unterricht Physik, Band 6, Aulis-Verlag
- [20] Wilhelm, T.; Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, M.; Wiesner, H. (2012): Einfluss der Sachstruktur auf das Lernen Newtonscher Mechanik. In: Bayrhuber, H.; Harms, U.; Muszynski, B.; Ralle, B.; Rothgangel, M.; Schön, L.-H.; Vollmer, H.; Weigand, H.-G. (Hrsg.): Formate Fachdidaktischer Forschung. Empirische Projekte – historische Analysen – theoretische Grundlagen, Fachdidaktische Forschungen, Band 2, Waxmann, Münster/ New York/ München/ Berlin, S. 237 – 258
- [21] Scheler, S.; Wilhelm, T. (2009): Neue Möglichkeiten durch Funksensoren. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 7, S. 28 – 35
- [22] Wilhelm, T.; Suleder, M. (2015): Stroboskopbilder mit „Live Video Strobe“. In: Plus Lucis, Heft 1-2, S. 14 – 18, <http://www.univie.ac.at/pluslucis/PlusLucis/151/S14.pdf>
- [23] Suleder, M.; Wilhelm, T. (2015): Stroboskopvideos. In: PhyDid B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Wuppertal 2015
- [24] Wilhelm, T. (2018): Sind die Bewegungskomponenten unabhängig voneinander? – In: Wilhelm, T. (Hrsg.): Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen, Aulis/Friedrich, Seelze, S. 27 – 30
- [25] Sauer, M. (2013): Ein Tutorial zu measure dynamics, <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Tutorial.pdf>