

Die magnetische Kanone

Christian Ucke, H.-Joachim Schlichting

Zur Beruhigung: Hier geht es nicht um Militärisches. Mit den heutzutage günstig erhältlichen magnetischen Kugeln aus Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) und Stahlkugeln lässt sich schnell eine Art Minibeschleuniger bauen, der manchmal auch als Gaußsche Kanone bezeichnet wird.

Wenn man eine Anordnung von gleichgroßen Stahlkugeln in eine Rinne legt und eine weitere von außen auf die Anordnung aufprallen lässt, fliegt die letzte der Stärke des Stoßes entsprechend mehr oder weniger weit fort. Der Rest bleibt liegen. Darüber wundert man sich kaum noch. Man kennt das Ergebnis von dem bekannten Kugelstoßpendel namens Newtons Cradle oder Newtons Wiege. Großes Erstaunen löst man aber normalerweise aus, wenn die letzte Kugel wie von einem Gewehr geschossen mehrere Meter weit fliegt, obwohl die andere Kugel nur ganz sacht gegen die Reihe gerollt wurde. Das scheint irgendwie nicht mit dem Energiesatz verträglich zu sein.

Der Effekt ist so überraschend, dass man einen Trick vermutet. Mit Recht, denn die benutzten Kugeln sehen zwar gleich aus, aber eine oder gar mehrere von ihnen haben es in sich: sie sind magnetisch (Abbildung 1).

Die heranrollende Kugel wird durch die Magnetkugel auf kurzer Strecke stark beschleunigt und prallt mit großer Geschwindigkeit auf die Anordnung der ruhenden Kugeln, ohne dass man die Heftigkeit so richtig bemerkt. Die Kugeln auf der rechten Seite werden zwar ebenfalls von der magnetischen Kugel angezogen und festgehalten, die äußere Kugel aufgrund des größeren Abstandes jedoch weniger stark. Daher reicht der Impuls der aufprallenden Kugel aus, um die letzte Kugel aus dem Magnetfeld zu befreien und mit großer Geschwindigkeit wegzuschleusen [1, 2, 3]. Eine noch größere Geschwindigkeit lässt sich erzielen, wenn auch die linke Kugel magnetisch ist – zwei Magnetkugeln ziehen sich fast doppelt so stark an, wie Magnetkugel und Stahlkugel.

Eine weitere Geschwindigkeitssteigerung erreicht man, wenn man die Kugeln in mehreren getrennten Gruppen anordnet und so für eine Kaskade von Stößen sorgt (Abbildung 1 unten). Hier wird die schnelle Kugel aus dem ersten Stoß ein zweites Mal beschleunigt. Eine Fortsetzung dieses kaskadenähnlichen Aufbaus ist denkbar und erinnert in gewisser Weise an große Beschleuniger. Welche Maximalgeschwindigkeit hier erreicht werden könnte, ist unseres Wissens noch nicht erprobt.

Als Spielzeug unter dem Namen Gaussian Gun wird die in Abbildung 2 gezeigte Anordnung vertrieben [4]. Hier sind alle Kugeln nichtmagnetisch, aber auf der Schiene sind zwei

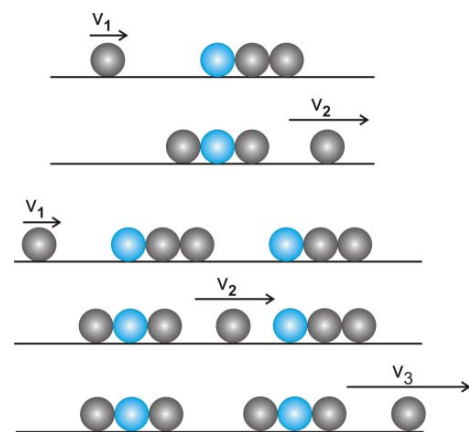


ABB. 1 KONSTELLATIONEN
Die grauen Kugeln sind nichtmagnetische Stahlkugeln, die blauen Kugeln NdFeB-Magnete.

zylinderförmige Magnete eng zusammen befestigt. Die von links kommende, einzelne Stahlkugel wird beschleunigt zu den Magneten gezogen und überträgt ihren Impuls auf die rechts befindlichen Stahlkugeln. Die ganz rechts liegende Kugel schießt dann mit hoher Geschwindigkeit weg.

Eine schon vor längerer Zeit publizierte Version der magnetischen Kanone bestand darin, einen Magneten an sich berührende, unterschiedlich große Stahlkugeln heran zu schieben (Abbildung 3) [5, 6]. Beide Kugeln werden angezogen und bleiben im Feld des Magneten auch in ständiger Berührung. Der größere Impuls der großen Kugel überträgt sich bei der Berührung mit dem Magneten auf die kleine Kugel. Diese kann sich dadurch aus dem Feld des Magneten lösen und schießt mit großer Geschwindigkeit davon, während die große Kugel am Magneten hängen bleibt. Hier spielen die unterschiedlichen Massen eine zusätzliche Rolle. Einen ähnlichen Effekt erzielt man auch direkt mit einer Magnetkugel und zwei unterschiedlich großen Stahlkugeln. Weitere Variationen, auch mit Kugeln aus anderen Materialien wie Glas überlassen wir dem Spieltrieb der Leser.

Lässt man eine Magnetkugel rollen, so bewegt sich mit ihr auch das Magnetfeld, das man sich wie das Dipolfeld der Erde vorstellen kann. In hinreichender Nähe einer Stahlkugel richtet sich jedoch einer der beiden Pole auf die Stahlkugel aus. Dann wird die Magnetkugel nur noch gleiten. Bei den Anordnungen in Abbildung 2 und dem oberen Teil der Abbildung 3 sind die Pole der Magneten von vornherein ausgerichtet. Eine auf die Magneten zurollende Stahlkugel wird schließlich auch gleiten, wenn die Rollreibung größer als die Gleitreibung der Kugel ist.

Kraftgesetze der Magnetkanone

Die erstaunliche Wirkung dieses Spielzeugs beruht vor allem in der Asymmetrie des Vorgangs. Während die extrem starke Beschleunigung der auslösenden Kugel wegen der Kürze des Weges kaum bemerkt wird, übertrifft die Schussweite alle Erwartungen. Um eine angemessenere Vorstellung von dem Geschehen zu bekommen, nehmen wir es etwas genauer unter die Lupe.

Um die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Kugeln berechnen zu können, muss man die Kraft einer Magnetkugel auf eine andere Kugel in Abhängigkeit vom Abstand messen. Dabei ergeben sich unterschiedliche Werte, je nachdem, ob Magnetkugel auf Magnetkugel oder Stahlkugel auf Magnetkugel wirkt. Meist lässt sich die Abhängigkeit gut durch ein Potenzgesetz beschreiben.

Die Messungen sind mit einfachsten Mitteln zu machen. In Abbildung 4 befindet sich auf einem nichtmagnetischen Blech (Messing,



Abb. 2 Ein Spielzeug mit dem Namen Gaussian Gun.

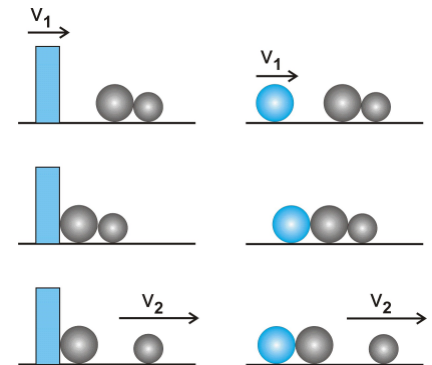


ABB. 3 VARIATION
Eine Variation der magnetischen Kanone.



Abb. 4 Anordnung zur Messung der Haltekraft bei Magnetkugeln.

Aluminium) definierter Dicke eine Magnetkugel. Darunter hängt die Stahl- oder Magnetkugel. Eine kleine Halterung aus Aluminium ist oben mit einer Bohrung versehen, so dass ein Teil der unteren Kugel hindurchpasst. An die Halterung hängt man immer schwerere Gewichte, bis die Kugel mit Halterung herunterfällt. Daraus ergibt sich die Haltekraft.

Abbildung 5 zeigt die auf diese Weise gewonnen Messwerte für die Kräfte von Magnetkugel auf Magnetkugel, Magnetkugel auf Stahlkugel und Stahlkugel auf Stahlkugel im Feld einer Magnetkugel. Da sich der Messbereich über fast drei Dekaden erstreckt, empfiehlt sich eine doppelt-logarithmische Darstellung.

Für die Kraft F auf eine Stahlkugel in Abhängigkeit vom Abstand x der Magnetkugel (Kurve 1), ergibt sich in sehr guter Näherung ein Potenzgesetz:

$$F = 1,934 \cdot 10^{-14} \cdot x^{-7,852} \quad (F \text{ in N, } x \text{ in m}).$$

Die Potenz von fast acht bedeutet schon eine extreme Abhängigkeit. Sie kommt vermutlich durch magnetische Quadrupole zustande, die von dem Dipol der Magnetkugel in der Stahlkugel induziert werden. Mit der Masse der Stahlkugel $m_S = 8,4 \text{ g}$ lassen sich Geschwindigkeit und Beschleunigung der Stahlkugel berechnen.

Die Kraft einer Stahlkugel auf eine Stahlkugel, die an einer Magnetkugel hängt (Kurve 2), lässt sich nicht mehr gut mit einem Potenzgesetz beschreiben. Tatsächlich ist die Zunahme der Kraft kurz vor Berührung geradezu extrem stark.

Die Kraft zweier Magnetkugeln aufeinander (Kurve 3) ist deutlich größer als die einer Stahlkugel auf eine Magnetkugel. Auch hier gilt in guter Näherung ein Potenzgesetz $F = 6,41 \cdot 10^{-14} \cdot x^{-4,0365}$. Die vierte Potenz erwartet man, wenn sich ein magnetischer Dipol im Feld eines anderen magnetischen Dipols befindet. Die magnetischen Kugeln bilden einen magnetischen Dipol, dessen Magnetfeld in der Dipolachse entsprechenden Messungen zufolge mit der dritten Potenz in Abhängigkeit vom Abstand abnimmt.

Mit diesen Kraftgesetzen können wir uns nun daran machen, die Geschwindigkeiten der Kugeln

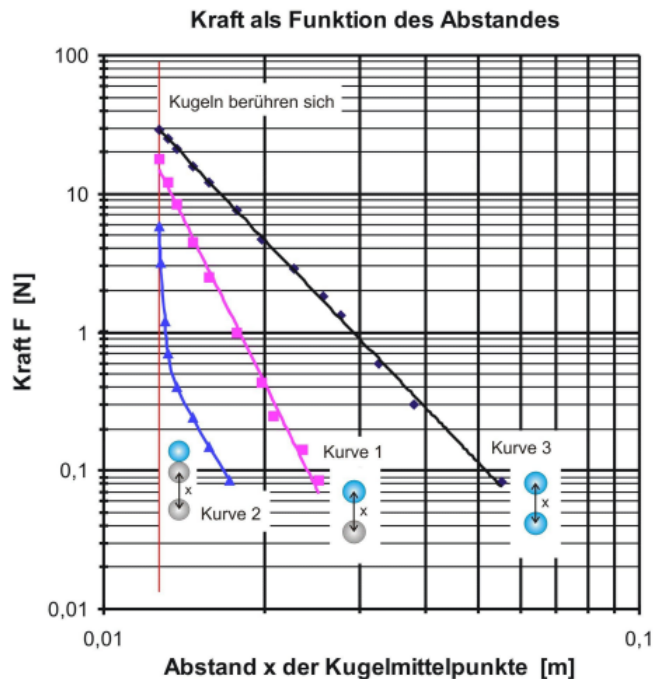


ABB. 5 KRÄFTE
Ergebnisse der Kraftmessungen, die die Magnetkugeln auf andere Kugeln ausüben.

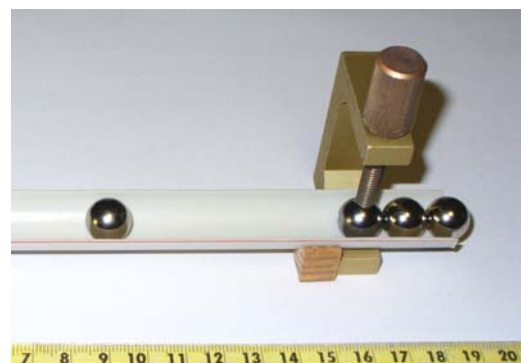


Abb. 6 Magnet- und Stahlkugeln in einem Halbrohr aus Plastik.

abzuschätzen. Hierfür haben wir die in Abbildung 1 oben gezeigte Anordnung etwas variiert. Sind nämlich alle Kugeln frei beweglich, so zieht die von links kommende nichtmagnetische Kugel beim Annähern an die magnetische Kugel mit der daran hängenden Stahlkugel diese an: Alle Kugeln bewegen sich dann aufeinander zu. Beim Abprall der rechts befindlichen Stahlkugel gibt es in der Folge einen Rückstoß, der drei Kugeln zurück schiebt. Sehr schön lässt sich das in einer Simulation verfolgen, die im Internet verfügbar ist [7]. Da auf diese Weise zusätzliche und aufwändig zu berücksichtigende Reibungsverluste entstehen, wurde die Magnetkugel mit einer nichtmagnetischen Zwinde festgehalten (Abbildung 6). Die Kugeln laufen in einem Plastikhalbrohr mit einem etwas größeren Innendurchmesser als der Kugeldurchmesser. Derartige Halbrohre lassen sich beispielsweise aus Isolierrohren für Elektrokabel mit einer Laubsäge herstellen.

Die Messungen der Kraft einer Stahlkugel auf eine Magnetkugel und einer Stahlkugel auf eine zweite Stahlkugel im Magnetfeld einer Magnetkugel sind in Abbildung 7 in linearer Darstellung aufgetragen. Die Fläche unterhalb der Kurve 1 (28,7 mJ) ist die Energie, die die Stahlkugel beim Zurollen auf die Magnetkugel gewinnt. Die Fläche unterhalb der Kurve 2 (2,1 mJ) ist die Energie, die benötigt wird, um die Stahlkugel aus den Fängen der Magnetkugel zu befreien. Die zweite Energie ist deutlich geringer, da die Stahlkugel nur mit geringerer Kraft an der anderen Stahlkugel haftet. Die Differenz beider Energien (26,6 mJ) ist die Energie, die die abprallende Stahlkugel unter Idealbedingungen mitbekommt. Daraus ergibt sich eine Geschwindigkeit von

$$v_e = \sqrt{2E/m} = \sqrt{2 \cdot 0,0266 \text{ J} / 0,0084 \text{ kg}} = 2,5 \text{ m/s}.$$

Hier sind Verluste nicht berücksichtigt, die durch Rollen oder Gleiten der Kugeln, durch nicht optimale Stoßübertragung zwischen den Kugeln und durch eventuelle Wirbelstromeffekte entstehen können.

Die Geschwindigkeit der wegfliegenden Kugel lässt sich gemäß einem Vorschlag von Kagan [3] ermitteln, indem man bei gegebener Höhe h die Flugweite w misst (Abbildung 8)

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot w^2}{2h}}.$$

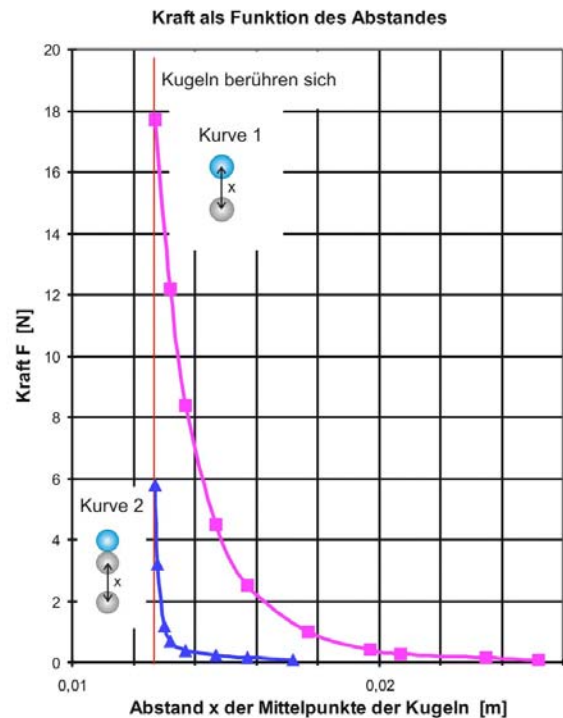


ABB. 7 ENERGIEN

Die Energien der auf- und abprallenden Stahlkugeln lassen sich aus den Flächen unterhalb der Kurven berechnen.

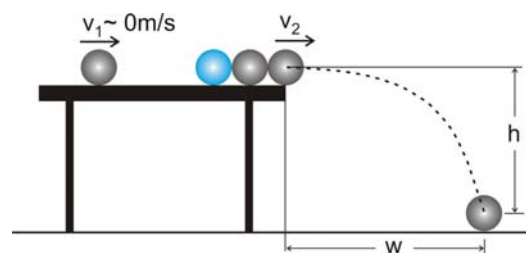


ABB. 8 FALLVERSUCH

Ermittlung der Geschwindigkeit der abprallenden Stahlkugel aus Flughöhe und Flugweite.

Es ergibt sich durch Messung $v \approx 2,2$ m/s. Das ist weniger, als oben berechnet wurde, weil die angeführten Verluste die Geschwindigkeit verringern.

Mit Hilfe des Kraftgesetzes lässt sich auch die Geschwindigkeit der sich einander nähernden Kugeln *berechnen*. In Abbildung 9 ist die gemäß dem obigen Kraftgesetz mit Tabellenkalkulation berechnete Geschwindigkeit der reibungsfrei gleitenden Kugel in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die Stahlkugel wird im Abstand von 3 cm von der Magnetkugel positioniert und dann angezogen. Die Kugel startet sehr langsam. Erst in den letzten Hundertstel Sekunden nimmt die Geschwindigkeit mit dem bloßen Auge nicht erkennbar rasant zu. Dies ist der wesentliche Grund für die Unauffälligkeit dieses Teilvorgangs und die überraschende Wirkung bei der fortschießenden rechten Kugel. Mit der Kenntnis des Potenzgesetzes ist diese enorme Geschwindigkeitszunahme auch zu erwarten. Die Kugel trifft mit einer Endgeschwindigkeit von etwa 2,5 m/s auf.

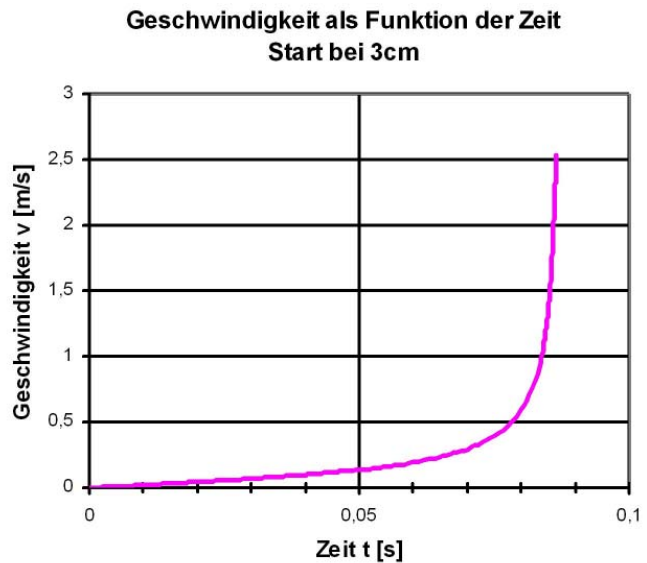


ABB. 9 GESCHWINDIGKEIT
Berechnete Geschwindigkeit der aufprallenden Stahlkugel

Aufgrund der Einfachheit der Messanordnung ist das Ergebnis erstaunlich gut.

Zusammenfassung

Mit den heute günstig erhältlichen Stahl- und Magnetkugeln lassen sich überraschende Experimente realisieren. Aufeinander prallende Kugeln können eine Art Schusseffekt induzieren, der auch als magnetische Kanone bezeichnet wird. Mit wenigen und einfachen Hilfsmitteln lassen sich Messungen machen, mit deren Hilfe quantitativ befriedigende Berechnungen möglich sind. Diese Experimente erlauben Variationen, die dem Spiel- und Forschungstrieb von Physikinteressierten aller Couleur ein weites Feld eröffnen.

Stichwörter

Newtons Cradle, Kugelstoßpendel, Impulserhaltung, Magnetkugeln.

Literatur

- [1] H. J. Schlichting, Physik in unserer Zeit **2005**, 36 (5), 243.
- [2] N. Goodman, Phys. Education **2005**, 40, 314.
- [3] D. Kagan, Phys. Teacher **2004**, 42, 24.
- [4] www.grand-illusions.com
- [5] H. Kern, Physik und Didaktik **1984**, 12, 336.
- [6] D. Schledermann, Der Arbeitsprojektor im Physikunterricht, Aulis-Verlag, Köln 1977.
- [7] www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=203.0

Für die Messungen wurden Magnet- und Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 12,7 mm der Firma Supermagnete (www.supermagnete.de) verwendet. Unerwarteterweise hatten nicht alle der nichtmagnetischen Stahlkugeln die gleichen, elastischen Eigenschaften. Es wurden dann die mit der höchsten Rückprallhöhe von einem glatten Steinfußboden ausgewählt.

Vorsicht: Die Magnetkugeln können splintern, das Material ist spröde. Außerdem besitzen die Kugeln aus NdFeB unter Umständen so starke Magnetfelder, dass Vorsicht mit allen Arten von Kredit- und Bankkarten mit Magnetstreifen sowie Speichermedien aller Art und Computern geboten ist. Außerdem kann man sich unangenehm die Haut einklemmen.

Die Autoren

Herr Ucke und Herr Schlichting sind die Begründer der Rubrik Spielwiese, in der sie sich vor allem der Physik von Spielzeugen und physikalischen Erklärungen von alltäglichen Vorgängen widmen.

Anschriften

Dr. Christian Ucke, Rofanstraße 14B, 81825 München, ucke@mytum.de.
Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Didaktik der Physik, Universität Münster, 48149 Münster, schlichting@uni-muenster.de