

Nicht nur zum Zündeln...¹

Streichhölzer im Dienste des Physiklernens

H. Joachim Schlichting WWU Münster

*Jeder Versuch ist ein Gedanke,
der den Sinnen wahrnehmbar gemacht ist durch eine Erscheinung...*

Johann Wolfgang von Goethe

Streichhölzer sind nicht nur zum Zündeln da. Als kleine, in größerer Stückzahl, ständig verfügbare Alltagsobjekte regen sie zum Spielen, Knobeln und Experimentieren an. Dabei können verblüffende, rätselhafte und raffinierte Zusammenhänge demonstriert werden, die in vielen Fällen als Ausgangspunkt physikalischer Modell- und Begriffsbildung herangezogen werden können.

Freihandversuche sind wegen der engen Verbindung von Idee und Versuch, von Phänomen und physikalischem Konzept beliebte und schnell verfügbare Möglichkeiten, das physikalische Denken vor dem Hintergrund der Alltagsvorstellungen der Schülerinnen und Schüler zu entwickeln (Ausführliche Darstellung siehe [1]). Im folgenden sollen einige Freihandversuche skizziert werden, die durch den Versuchsgegenstand selbst, in diesem Fall Streichhölzer, in nichtthematischer Verbindung stehen. Ausgangspunkt ist also nicht die Fachsystematik, sondern in der

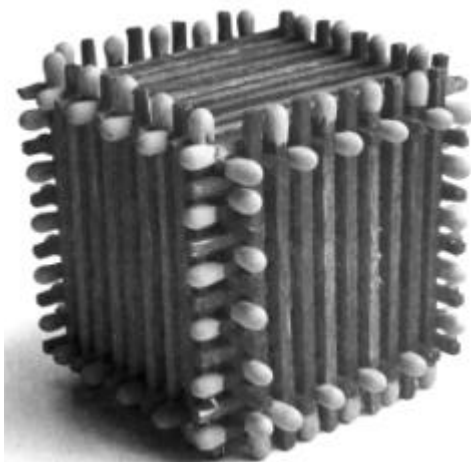


Bild 1: Ein sich selbst stabilisierender Würfel aus Streichhölzern. Entscheidend für die Stabilität ist die Reibung zwischen den Hölzern.
einen oder anderen Weise verblüffende Phänomene.

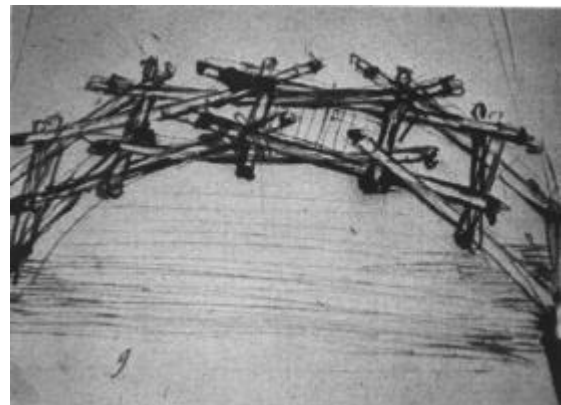


Bild 2: Zeichnung Leonardos einer Bogenbrücke Cod. Alt. f.22r

Streichhölzer werden nicht nur zum Anzünden von Zigaretten gebraucht. Wegen ihrer Kleinheit und universellen Verfügbarkeit dienen sie zahlreichen anderen Zwecken. Zum Knobeln werden sie ebenso gebraucht wie als Zahnstocher, auch als Dübelersatz für kleine Schrauben tun sie gute Dienste. Vom Basteln und Spielen kennt man sie von früher Kindheit an. Hier sind vor allem Modelle von Schiffen aus abgebrannten und gesammelten Streichhölzern zu nennen sowie Legespiele und Puzzles [2].

Im folgenden stellen wir eine Sammlung von Streichholzversuchen zusammen (siehe auch: [3]).

¹ Erschienen in: Physik in der Schule 38/5 (2000), S. 330-334

Die Leonardo- Brücke

Von Leonardo da Vinci stammt die Idee einer bogenförmigen Brücke, die aus relativ kurzen Balken besteht. Ihm ging es um "einfachste, aber resistente Brücken" [4], "die ohne viel Zeitaufwand konstruierbar und aus leicht zu beschaffendem, transportablem Material (kleine Stämme, belastbare Verbindungsstücke)" [5] errichtet werden konnten (Bild 2). Mit der Brückenform versuchte Leonardo auf zweckmäßige Weise statische und Prinzipien der Materialfestigkeit zu verbinden.

Auch die Modellbrücke aus Streichhölzern erfüllt diese

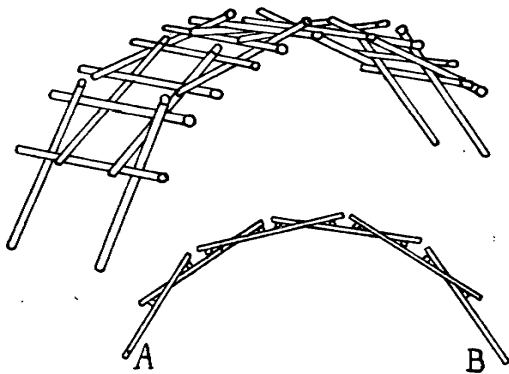


Bild 4: Streichholzmodell der Leonardo- Brücke.

Bedingungen. Sie kann nach Bild 4 leicht nachgebaut werden. Hat man mit etwas Geduld das kleine Bauwerk aus Streichhölzern errichtet, so ist man erstaunt über die Tragfähigkeit, die Selbststabilisierung der Brücke bei Belastung und über die verhältnismäßig große Spannweite, die mit den kurzen Hölzern ohne weitere Befestigungen wie Seile und Nägel erreicht werden kann. Wesentlich ist hier die Reibung zwischen den Hölzern, die andere Fixierungen überflüssig macht und mit der Last noch gesteigert werden kann.

Und nun noch ein "Brückenrätsel": Mit der Leonardo-Konstruktion lassen sich auch größere Gräben überbrücken. Doch was tut man, wenn man nur vier gleichlange Bretter (Streichhölzer) zur Verfügung hat, die gerade etwas kürzer sind als die Breite des Baches, den man überqueren will? Man denkt sich eine passende Konstruktion aus. Die Lösung ist in Bild 11 dargestellt. Man kann mit einfachen geometrischen Überlegungen sogar berechnen, um wieviel die Länge a der Bretter (Streichhölzer) im Prinzip übertroffen werden kann. Wenn man die beiden schrägen Bretter (Streichhölzer) gerade im Winkel von 90° zueinander ausrichtet, beträgt die Gesamtlänge der Konstruktion $(1 + \sqrt{2}) a/2 \approx 1,2 a$. Der Bach darf also etwa 20 % breiter sein als die Länge der Bretter (Streichhölzer).

Standfestigkeit durch Trägheit

Versucht man eine (gefüllte) Streichholzschachtel aus einer Höhe von etwa 30 cm so fallenzulassen, dass sie hochkant auf der Unterlage stehen bleibt, so wird man in der Regel erfolglos sein. Obwohl die Streichholzschachtel in dieser Lage eine (lokale) Stabilität aufweist, weil der Schwerpunkt oberhalb der Unterstützungsfläche liegt, sorgen Störungen beim Aufprall dafür, dass die Schachtel umkippt, d.h. in die stabilste Lage mit dem Schwerpunkt in der niedrigsten Höhe zu liegen kommt.

Gibt es eine Möglichkeit, diese Störungen zu beseitigen

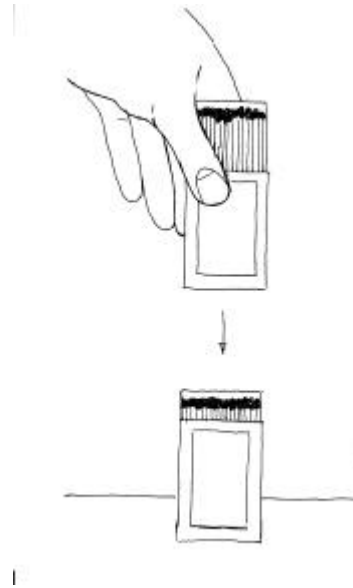


Bild 3: Die geöffnete Schachtel fällt inelastisch.

bzw. so weit zu vermindern, dass der Versuch gelingt?

Dazu untersuchen wir zunächst, wodurch die Störungen zustande kommen. Beim Auftreffen der Schachtel auf der Unterlage wird nur ein Teil der Energie dissipiert. Ein anderer Teil wird als elastische Energie zwischengespeichert und wie bei einem hüpfenden Ball unmittelbar nach dem Aufprall wieder verfügbar. Die Schachtel prallt ein wenig in die eine oder andere Richtung zurück, jedenfalls in den meisten Fällen so, dass sie umkippt.

Sorgt man dafür, dass die Energie der Schachtel beim Aufprall vollständig dissipiert wird, so sollte der Versuch gelingen. Eine erfolgreiche Möglichkeit besteht darin, dass man die Schublade der gefüllten Schachtel etwas mehr als zur Hälfte herauszieht und den Versuch mit der so verlängerten Schachtel wiederholt. Wenn die Lade leichtgängig ist, sollte es auf diese Weise relativ leicht fallen, sie in der gewünschten Weise zum Stehen zu bringen (Bild 4).

Beim Aufprall der Schachtel bewegt sich die Schublade aus Trägheit gegen den (wenn auch geringen) Reibungswiderstand weiter nach unten und macht den Stoß mit der Unterlage fast völlig inelastisch. Es wird keine elastische Energie verfügbar, die die Schachtel zurückprallen und umkippen läßt. Ein derartig inelastischer Stoß gelingt beispielsweise mit einem Ball aus Knetmasse, der ebenfalls

liegen bleibt. Die kinetische Energie wird durch die Verformung des Balls dissipiert. Auch unsere Schachtel wird verformt. Aus der geöffneten wird eine geschlossene.

Formstabilität

Die Stabilität eines Objekts wird aber nicht nur durch das Material bestimmt, sondern auch und in erster Linie durch die Formgebung. Ein Blatt Schreibpapier, das zur Überbrückung einer Kluft verwendet wird, "bricht" bzw. biegt sich bereits unter dem eigenen Gewicht zusammen. Faltet man hingegen dasselbe Blatt Papier zieharmonikaartig, so stellt es eine stabile Unterlage dar, die mit weiteren Massen belastet werden kann. Einer Durchbiegung steht jetzt nicht mehr nur der dünne Querschnitt des Papiers entgegen. Darüber hinaus wird durch Zug- und Druckkräfte die Stabilität des Papiers in Längsrichtung ausgenutzt. Von dessen Größe verschafft man sich einen Eindruck, wenn man ein Papier durch Auseinanderziehen an beiden Enden zerreißen möchte.

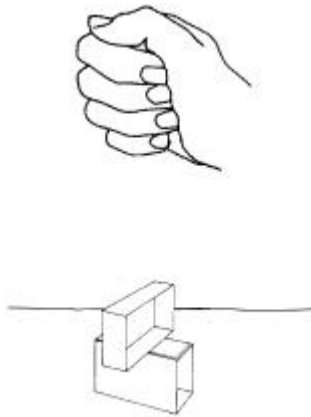


Bild 5: Läßt man die Faust auf das Schachtelgebilde fahren, so richtet man kaum eine Zerstörung an.

Durch ihre besondere Form erhält auch die Streichholzschachtel eine Stabilität, die man dem ansonsten relativ flexiblen Karton, aus dem sie geformt ist, nicht zutrauen würde. Davon kann man sich auf eindrucksvolle Weise überzeugen, wenn man die Schublade quer über die Hülle legt (Bild 5) und versucht, diese Anordnung mit einem Faustschlag platt zu machen. Wider Erwarten bleiben die Teile der Schachtel meist unversehrt, weil sie beim Aufschlag der Hand auseinanderfliegen. Obwohl man einen deutlichen Widerstand spürt, vermögen die stabilen Seitenwände der Schachtel den bei der ersten Berührung ausgeübten Druck ohne Schaden aufzunehmen.

Die Stabilität durch besondere Formgebung ist im Alltag insbesondere im Bereich der Verpackungen von Bedeutung. Man denke nur an die stabilen Getränkebehälter, Eirkartons, der Form von Früchten angepaßte Pappschalen u.ä. aus verhältnismäßig dünnem Material. Bei manchen Kartons wird auch noch die Stabilität der Wände durch sogenannte Wellpappe verstärkt, der die oben erwähnte

Zieharmonikaform zugrunde liegt, die zusätzlich durch aufgeklebte Deckblätter aus Papier fixiert wird.

Das träge Ei

Ein in der Hülle einer Streichholzschachtel gestelltes Ei wird auf einem Brettchen über einem Glas mit Wasser gestellt. Die Problemstellung lautet: Läßt sich das Ei in das Wasserglas transportieren, ohne es zu berühren. Es gelingt, wenn man das Brettchen mit einem Ruck zur Seite zieht. Dann fällt das Ei zur großen Überraschung genau in das darunter liegende Wasserglas.

Aufgrund der relativ großen Dichte des Eis ist die Trägheit so groß, dass die Reibung mit der Unterlage nicht ins Gewicht fällt und so gut wie keine Verschiebung auftritt. Demgegenüber wird die leichte Hülle, die nur eine geringe Trägheit besitzt, aufgrund der Reibung mit dem Brettchen mitgerissen und landet weit vom Glas entfernt.

Streichholz(schachtel) als Boot

Der folgende Versuch ist vor allem als Gedankenexperiment mit physikalischem Hintergrund bekannt: Wie ändert sich der Wasserspiegel eines Sees, wenn man aus einem Boot einen Klumpen Gold über Bord wirft? Die richtige Antwort lautet: Der Wasserspiegel sinkt, denn das Boot verdrängt ohne Gold weniger Wasser als mit. Zwar verdrängt auch das ins Wasser eintauchende Gold so viel Wasser wie sein eigenes Volumen beträgt. Das ist aber sehr viel weniger als es durch die Belastung des Bootes verdrängte.

Mit einer Streichholzschachtel als Boot, einer Münze (5 DM – Stück) als Goldstück und einem möglichst kleinen zylindrischen Glas läßt sich das Gedankenexperiment realisieren und sogar zumindest größenordnungsmäßig quantitativ überprüfen. Man zeichnet den Wasserstand mit Geldstück im Boot und im Wasser am Glasgefäß an und kann aus der Differenz berechnen, wieviel Wasser mehr verdrängt wird, wenn das Geld in der Schachtel ist. Daraus könnte man sogar die Dichte des Geldstücks abschätzen.

Einzelne Streichhölzer lassen sich als Boot mit Antrieb benutzen. Dazu spaltet man ein Streichholz am Ende ein wenig auf und klemmt etwas Seife dazwischen. Das so präparierte Streichholz rast wie ein Schnellboot über die Wasseroberfläche.

Eine interessante Variante eines Antriebs erhält man, wenn man ein Streichholz am Ende mit einem Tropfen Allesskleber (ausprobiert wurde der Versuch mit Uhu®) versieht. Legt man das Streichholz auf eine Wasseroberfläche, so wird es je nach Größe des Klebstofftropfens mehr oder weniger lange ein interessantes Wechselspiel zwischen Phasen eines kontinuierlichen Vortriebs und plötzlichen Beschleunigungen vollführen, dem keine Regelmäßigkeit anzusehen ist.

Der Vortrieb kommt dadurch zustande, dass das Lösungsmittel des Klebstoffs sich als Gas verflüchtigt und aus dem Tropfen austritt. Dabei wird eine Kraft auf das Wasser ausgeübt, die gemäß $actio = reactio$ einen Rückstoß auf das Streichholz bedingt und zum Vortrieb führt. Je nachdem ob der Gasstrom in geringer Rate oder in einer größeren Blase auf das Wasser übertragen wird, kommt es zu einer langsameren oder heftigen ruckweisen Bewegung. Der irreversible, mit Energieentwertung einhergehende Vorgang, wonach das Lösungsmittel dazu tendiert, sich auf das zur Verfügung stehende Volumen zu verteilen, macht sich hier als Antrieb der Bewegung bemerkbar].

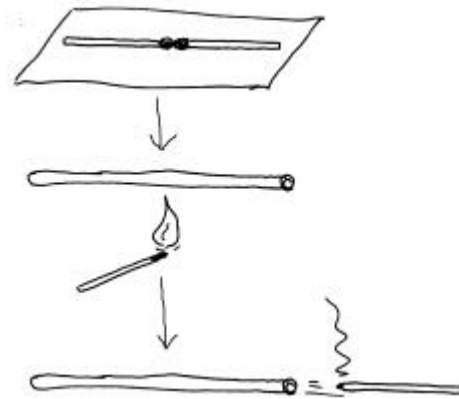


Bild 6: Wie ein Geschöß fliegt eines der Streichhölzer aus der Aluminiumfolienhülle hinaus.

Wasserkochen in der Schachtel

Auf der Herdplatte oder über einer Kerzenflamme kann man das in die Schublade einer Streichholzschachtel gefüllte Wasser zum Sieden bringen. Warum verbrennt die Schachtel nicht?

Damit Holz oder Papier brennt und die entstehende Verbrennungswärme abgeben kann, muß man ihm zunächst Energie zuführen, um die sogenannte Entzündungstemperatur zu überschreiten. Dies gelingt um so besser, je dünner das Holzsplit oder das Papier ist. Es ist gar nicht so einfach, einen Holzbalken beispielsweise mit einer Kerzenflamme zum Brennen zu bringen. Denn das Holz ist so dick, dass sich die Wärme auf die relativ große Masse verteilt, so dass es nur zu einem geringen Temperaturanstieg kommt. Pappe oder Papier ist da schon besser geeignet. Wenn man aber im Falle unserer Schachtel dafür sorgt, dass die zugeführte Wärme an das Wasser abgeleitet wird, und sich die Temperatur des Papiers gerade so schnell erhöht wie die des Wassers, kann die zugeführte Wärme der Schachtel so gut wie nichts anhaben. Da Wasser außerdem nur bis $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ erwärmt werden kann und dann anfängt zu verdampfen, erreicht man nie die für die Entzündung von Papier nötige Temperatur von einigen hundert Grad Celsius. Es sei denn, man wartet, bis alles Wasser verdampft ist.

Dieser Versuch ist geeignet, darauf aufmerksam zu machen, dass bei der Beurteilung von Wärmeaustauschvorgängen nicht nur die Temperatur, sondern auch die Energie bzw. die Energieströme von Bedeutung sind.

Streichholzkanone

In diesen beiden Freihandversuchen werden Streichhölzer auch in ihrer Funktion zu zünden und aufgrund der thermischen Energie Kräfte zu entfalten eingesetzte.

Der erste Versuch besteht darin, daß zwei Streichhölzer mit den "Köpfen" gegeneinander in Aluminiumfolie eingewickelt werden (Bild 6). Nun hält man das Röhrchen an dem einen Ende fest, und erhitzt die Stelle, an der sich die Köpfe befinden durch die Flamme eines angezündeten dritten Streichholzes. Nach kurzer Zeit kommt es zur Entzündung der eingewickelten Streichhölzer, und das

freie Streichholz fliegt aus dem anderen Ende der Hülle unter Zischen wie ein Feuerwerkskörper in miniature davon.

Durch die gute Wärmeleitung des Aluminiums wird die Wärme der Flamme auf die Streichholzköpfe übertragen

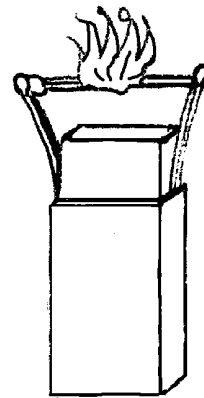


Bild 7: Unter Spannung gesetztes Streichholz.

bis nach kurzer Zeit die Zündtemperatur erreicht ist. Die Streichhölzer flammen auf, und durch den Druck der explosionsartig entstehenden Verbrennungsgase wird das lose Streichholz aus der röhrenartigen Aluminiumfolienhülle herausgetrieben.

Im zweiten Versuch werden zunächst je ein Streichholz zwischen der ein wenig herausgezogenen Lade und der Hülle geschoben. Dann wird ein drittes Streichholz zwischen die beiden Hölzer geklemmt, wobei diese aufgrund geringeren Breite der Schachtel elastisch auseinandergelassen werden (Bild 7).

An dieser Stelle könnte man die Frage stellen, warum nur die beiden seitlichen Hölzer, nicht aber das eingeklemmte Streichholz verbogen werden. Da man davon ausgehen kann, dass alle Hölzer in etwa identisch sind und sich daher gleichartig verhalten sollten, muss die Antwort mit den unterschiedlichen Querschnitten der Streichhölzer zusammenhängen, die in dieser Konstruktion beansprucht

werden. Das zwischen die beiden Randhölzer eingeklemmte Streichholz wird über den die gesamte Streichholzlänge ausmachenden "Querschnitt" gestaucht. Demgegenüber gerät bei ersteren nur der mit der Dicke der Streichhölzer zusammenhängende Querschnitt unter Druck. Da die Druck- und Spannkraft aber proportional zum Querschnitt sind, ist das längs eingeklemmte Streichholz sehr viel stabiler gegen Verformung als bei den anderen.

Was passiert, wenn mit einem weiteren Streichholz der eingespannte Streichholz in der Mitte entzündet wird? Geraten auch die beiden anderen Hölzer in Brand? Dazu kommt es nicht, wie man sich leicht überzeugen kann. Denn sobald durch das Anbrennen der Querschnitt des Holzes der Querschnitt in der Mitte schwächer wird, überwiegt die Spannkraft der elastisch verbogenen seitlichen Hölzer und verbiegen nun ihrerseits das brennende Holz. Wenn man Glück hat, wird die brennende Fackel förmlich weggeschleudert. Manchmal fällt sie aber auch nur herunter.

Die Marmeladenseite bleibt oben

Jeder kennt das unfreiwillige Experiment einer mit Marmelade bestrichenen Scheibe Brot, die auf der Marmeladenseite landet, wenn sie über die Tischkante rutscht. Das Experiment ist in den letzten Jahren wiederholt beschrieben worden. Es hat sogar den Titel eines Buches mit Freihandversuchen abgegeben: "Why Toast lands Jelly-Side Down" von Robert Ehrlich [6]. Für die Erklärung dieses Phänomen ist nicht Murphy, sondern Newton zuständig.

Der Fall auf die "falsche" Seite herrscht sowohl bei normalen Tischen von etwa 70 cm Höhe als auch bei kleineren Couchtischen von etwa 40 cm Höhe. Um das ohne Schweinerei zu überprüfen, kann man beispielsweise ein DIN A6 -Notizbuch (ca. 10 cm breit) benutzen. Damit ist bereits gezeigt, dass nicht etwa der "schwerere" Aufstrich für den "Unfall" verantwortlich ist. Entscheidend ist die Länge des Brotes bzw. Buches senkrecht zur Tischkante, über die es geschoben wird. Denn wenn man kein Notizbuch benutzt, sondern eine Streichholzsachtel (besonders geeignet sind die flachen Schachteln), dann stellt man beim normalen Tisch fest, dass sie vorwiegend auf der "richtigen" Seite landen. Demgegenüber verhalten sich die Streichholzsachteln beim niedrigeren Couchtisch wie das Marmeladenbrot: Sie kommen auf die Oberseite zu liegen.

Die Versuche mit den Streichholzsachteln gelingen dann besonders gut, wenn man durch eine weiche Unterlage verhindert, dass sie beim Auftreffen unkontrolliert herumhüpfen mit entsprechend zufallsbedingtem Versuchsausgang.

Diese Versuche zeigen, dass die über die Tischkante abgleitenden flachen Gegenstände weitgehend unabhängig von ihrer Beschaffenheit zu rotieren beginnen. Auf welcher Seite sie dann landen hängt davon ab, wie weit sie sich gedreht haben, wenn sie auftreffen. Es zeigt sich, dass



Bild 9: Ein Streichholz auf einer Heftzwecke aufgespießt macht den Puls sichtbar.

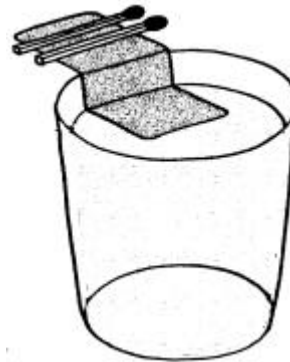


Bild 8: Adhäsionskraft in "Streichholzeinheiten" gemessen.

beim normalen Tisch das Notizbuch in etwa bei einer halben Umdrehung auftrifft, während die kleinere Streichholzsachtel dann bereits in etwa eine ganze Umdrehung gemacht hat. Beim kleineren Couchtisch schafft auch die Streichholzsachtel nur eine halbe Umdrehung. Mit anderen Worten: Je kleiner die Abmessungen des rotierenden Gegenstandes, desto schneller rotiert er.

(Anregungen für eine quantitative Analyse dieses Freihandversuchs findet man beispielsweise in dem Buch von Ehrlich [6, S. 75ff]).

Pulsverstärker

Spießt man ein Streichholz vorsichtig auf einer Heftzwecke auf, so hat man einen low-cost - Pulsverstärker. Man positioniert das "Gerät" vorsichtig auf die Stelle des Handgelenks, an der man den Puls spürt und legt den Arm bequem auf eine feste Unterlage. Man kann jetzt an den leichten Schwankungen des Streichholzes deutlich die Herzschläge ablesen (Bild 8).

Die Heftzwecke ist einerseits schwer genug, andererseits von ausreichender Auflagefläche, um den gemeinsamen Schwerpunkt so tief zu legen, dass die Konstruktion relativ stabil gegen kleine Schwankungen ist. Das Streichholz

ist lang genug, um kleine Auslenkungen der aufliegenden Heftzwecke bis in den Sichtbarkeitsbereich hinein zu verstärken.

Streichhölzer zum Austarieren

Streichhölzer lassen sich wegen ihrer geringen aber weitgehend gleichen Masse als ideale Wägestücke zum Austarieren nutzen.

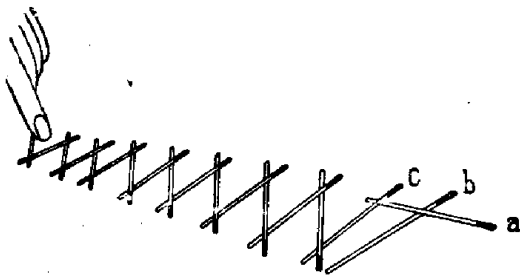


Bild 10: Energieübertragung durch eine Streichholzkette (nach [8]).

Zum Beispiel kann man sich mit Hilfe eines geeignet gefalteten Pappstreifens, dessen äußeres Ende mit Streichhölzern belastet wird, einen Eindruck von der Größe der Adhäsionskraft verschaffen (Bild 9).

Warum haftet die Pappfläche auf der Wasseroberfläche? Zur Ausbildung der Grenzschicht zwischen Pappe ist offenbar weniger Oberflächenenergie nötig als zwischen Wasser und Luft. Wenn die Pappe die Wasseroberfläche berührt, wird die Differenz der Oberflächenenergie dissipiert. Das Gesamtsystem kommt dem thermodynamischen Gleichgewicht auf diese Weise näher.

"Energieübertragung" durch eine Streichholzkette

Quer über ein auf dem Tisch liegendes Streichholz b (Bild 10) wird ein zweites a so gelegt, dass es mit dem Kopf auf dem Tisch zu liegen kommt. Über das hochragende Ende von a wird ein drittes gelegt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Kopf von a nicht angehoben wird, was erst durch zusätzlichen Druck auf c bewirkt werden soll. Über c legt man in der gleichen Weise ein viertes Streichholz usw. bis eine längere Streichholzkette entsteht.

Wenn man auf das letzte Streichholz drückt, so passiert dasselbe, wie wenn man auf c drückt: der Kopf von a wird angehoben. Durch das Herabdrücken des letzten Streichholzes wird das vorletzte angehoben, was wiederum das vorvorletzte anhebt, bis die potentielle Energie, die man auf diese Weise dem System überträgt in a angekommen ist. Man kann mit diesem Energieüberträger auch etwas "Nützliches" anstellen. Legt man auf dem Kopf von a eine Streichholzschantel, so wird diese angehoben, wenn das letzte Streichholz gedrückt wird.

Und zum Schluss eine Aufgabe

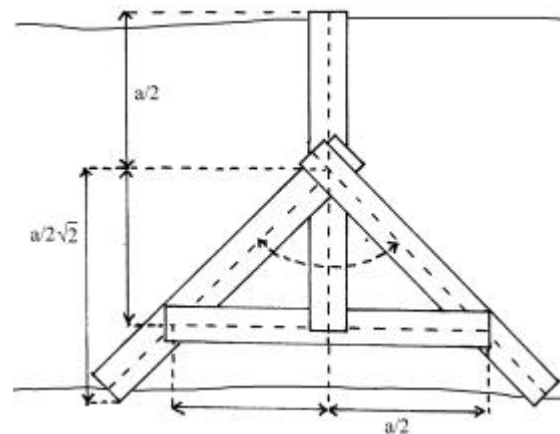


Bild 11: Lösung der Brückenkonstruktion mit vier Brettern (bzw. Streichhölzern).

Eine aufrecht aufgestellte Streichholzschantel wird durch leichten Stoß mit dem Finger umgekippt. Wider der Erwartung, dass die Schantel in der dadurch erreichten stabilen Lage liegenbleibt, ruckt sie kurz nach dem Aufprall ein kleines Stückchen in Fallrichtung weiter. Wie kommt es zu dieser Bewegung?

Literatur

- [1] Schlichting, H. Joachim: Hands-on, Low-cost, Freihand-Experimente zwischen Alltag und Physikunterricht. Physik in der Schule 38/4 (2000), S. 255-259
- [2] Delft, Pieter van; Botermans, Jack: Denkspiele der Welt. München: Hugendubel 1977, S. 49ff
- [3] Schlichting, H. Joachim: Vom Zündholz zur zündenden Idee. Unterricht Physik 57/11 (2000)
- [4] Leonardo da Vinci in einem Brief an Moro z.n. [5].
- [5] Cianchi, Marco: Die Maschinen Leonardo da Vincis: Firenze: Edizioni Beccucci, S. 24
- [6] Ehrlich, Robert: Why Toast lands Jelly-Side Down. Princeton: University Press 1997.
- [7] Schlichting, H. Joachim: Freihandversuche mit Streichhölzern und deren Schanteln. Naturwissenschaften im Unterricht-Physik 57 (2000), S. 26-28
- [8] Hahn, Hermann: Physikalische Freihandversuche I. Teil. Berlin: Otto Salle 1905, S. 14