



Follow Me Box

 **Lufthansa
Technical Training**

 **LI**
HAMBURG

 **Luftfahrtstandort
Hamburg**
Hamburg – The place for aviation

Faszination Fliegen

Die Follow Me Box ist eine Initiative von:



Mit Unterstützung von:



Faszination Fliegen

ab Jahrgangsstufe 4

Vorwort

Das Thema „Luft und Fliegen“ ist in den neuen Rahmenplänen für Naturwissenschaften/Technik, Klassenstufe 5/6, enthalten. Der Bezug zur Welt der Schüler ist mit diesem Thema gut herstellbar, da viele schon einmal mit einem Flugzeug geflogen sind. Ferner zählt Hamburg heute weltweit zu den größten Flugzeugproduktionsstandorten, denn bei Airbus Deutschland in Finkenwerder findet die Endmontage der Flugzeugtypen A318, A319 und A321 statt sowie eine Modulfertigung des neuen Superfliegers A380. Hinzu kommt, dass Hamburg die Luftwerft der Lufthansa (Lufthansa Technik AG) beherbergt, einen der weltweit größten Reparatur- und Wartungsbetriebe für Flugzeuge vieler internationaler Fluggesellschaften.

Die Folge dieser Aktivitäten ist, dass der Luftfahrtstandort Hamburg das bundesweit führende Ausbildungszentrum für luftfahrttechnische Berufe ist. So wird an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften ein Aufbaukurs Flugzeugbau durchgeführt, das Arbeitsamt finanziert eine Fortbildung zum technischen Fachredakteur Luftfahrt, an der Gewerbeschule G 15 wurde eine Technikerklasse eingerichtet und die Lufthansa Technical Training bietet Trainingsmodule an.

All dies zeigt aber auch, dass Hamburg in Zukunft für diesen wachstumssträchtigen Sektor Nachwuchs, d.h. Schüler, die sich für Technik interessieren – vielleicht sogar begeistern – dringend benötigt.

Die „Initiative Luftfahrtstandort Hamburg“, in der maßgebliche Leute aus der Luftfahrtindustrie mitarbeiten, hat an der erfolgreichen Umsetzung der eben beschriebenen Aktivitäten einen nicht unmaßgeblichen Anteil.

In der vorliegenden Broschüre werden Schulexperimente zum Thema „Luft und Fliegen“ für die Klassenstufe 5/6 vorgestellt. Sie können aber auch im Projektunterricht bzw. in Wahlpflichtkursen der Sekundarstufe I Verwendung finden. Die Impulse sollen Anregungen für die vielfältige Gestaltung von Lernsituationen mit Schülerexperimenten geben.

Wenn man sich mit der Faszination Fliegen beschäftigt, ist es selbstverständlich, dass auch viele andere Bereiche der Physik angesprochen werden wie z.B.

- a) Auftrieb von Körpern im Wasser
- b) statischer Auftrieb bei gasgefüllten Ballons und Heißluftballons
- c) Druck und Unterdruck (hier werden wichtige Aspekte des Wahlthemas „Luft“ behandelt)
- d) Flugphänomene in der Natur
- e) aerodynamischer Auftrieb bei von Luft umströmten Körpern
- f) Abhängigkeit der Auftriebskraft von bestimmten Profilen und deren Anstellwinkel
- g) Bau eines flugfähigen Gleiters
- h) Einführung in das Raketenprinzip

Das vorliegende Konzept bezieht diese Aspekte mit ein und basiert darauf, dass viele Versuche mit einfachen und preiswerten Materialien* durchgeführt werden können und mit Geräten, die in den meisten Schulen sowieso vorhanden sind, wie z.B. Kraftmessern, Stellzeug, Bechergläsern usw.. Föhne, die man für Strömungsversuche benötigt, können entweder von

* Eine Materialliste kann beim Landesinstitut angefordert werden.

den Schülern mitgebracht oder relativ preisgünstig im Handel erworben werden. Gebläse und Geräte zu Untersuchungen zur Aerodynamik lassen sich aber auch in der NW-Ausleihstation am Landesinstitut ausleihen.

In der Luftfahrtwerkstatt des NW-Zentrums des Landesinstituts im Bildungszentrum Mümmelmannsberg wird es sowohl Lehrkräften als auch Schülern ermöglicht, zu diesem Thema experimentell zu arbeiten. Zum einen werden Praktika für Schulklassen und Lerngruppen angeboten, in denen selbstständig Fluggeräte gebaut und erprobt, Originalflugzeugteile demonstriert, Untersuchungen zur Aerodynamik geleistet und Anregungen zur Berufsorientierung gegeben werden, zum anderen werden Seminare für Lehrkräfte durchgeführt, in denen Experimente, verbunden mit Grundlagenkenntnissen, kennen gelernt und erprobt werden.

Dank des EU-Projektes RIS++Hamburg und der „Initiative Luftfahrtstandort Hamburg“ konnte der Aufbau einer Luftfahrtwerkstatt realisiert und die 1. Auflage der Broschüre „Faszination Fliegen – Impulse für Lehrkräfte“ erstellt werden. Es bietet somit die Startvoraussetzungen für eine umfassende Unterstützung der Lehrkräfte, das Thema „Luft und Fliegen“ praxisnah sowohl in der Luftfahrtwerkstatt als auch in jeder Schule zu gestalten.

Arbeitsmaterialien zum Thema „Faszination Fliegen“

Inhalt

FASZINATION FLIEGEN

Sachinformationen

- 1 Auftrieb in Flüssigkeiten
- 2 Lufthülle der Erde
- 3 Auftrieb in Gasen
- 4 Natur als Vorbild für Flugobjekte
- 5 Vogelflug als Vorbild für Flugzeuge
- 6 Auftrieb bei bewegter Luftströmung
- 7 Bau eines Fluggleiters
- 8 Raketenflug
- 9 Sicherheitsaspekte
- 10 Anhang
- 11 Versuchs-Arbeitsblätter

Faszination Fliegen

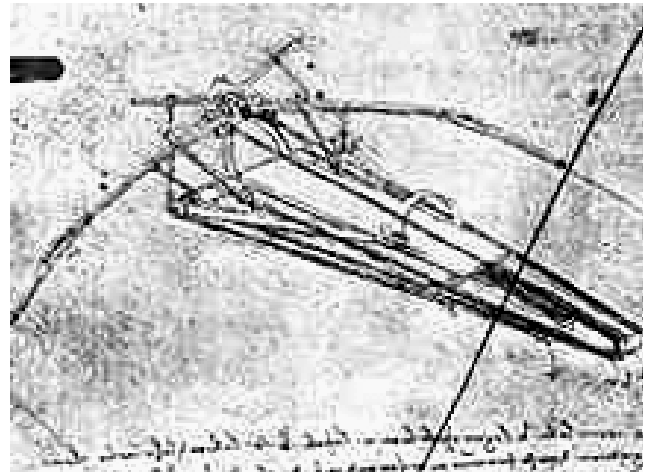
Sachinformationen

Historische Grundlagen des Fliegens

Schon im Altertum träumten die Menschen vom Fliegen, was in der Sage von Ikarus und Dädalus zum Ausdruck kommt. Dädalus, ein berühmter griechischer Baumeister, baute für sich und seinen Sohn Ikarus aus Federn und Wachs Flügel, um damit aus dem Gefängnis des Königs Minos auf der Insel Kreta zu entfliehen. Ikarus, einmal in der Luft, wollte höher hinaus, die Welt von oben betrachten; er kam der Sonne zu nahe, das Wachs schmolz, und er stürzte ab. Diese Sage des römischen Dichter Ovid (43 v. Chr. bis 18 n. Chr.) charakterisiert die wesentlichen Antriebskräfte in der Entwicklung der Flugtechnik: Verbesserung der Lebensbedingungen und der Drang, die Erdgebundenheit zu überwinden und Träume zu verwirklichen. Ähnliche Sagen, Mythen und Träume finden sich zu allen Zeiten und in allen Kulturkreisen.



Ikarus und Dädalus



Ornithopter von Leonardo

In der Renaissance beschäftigte sich das Universalgenie Leonardo da Vinci (* 1452, † 1519) mit dem Problem des Fliegens. Durch die Beobachtung der Vogelwelt war er derart von der Idee des Fliegens fasziniert, dass er einen Ornithopter bzw. mechanischen Schwingenflügler konstruierte (spätere Berechnungen zeigten aber, dass die menschliche Kraft nicht ausreicht, um mit diesem Gerät zu fliegen); ferner entwarf er einen Fallschirm. Seine Entwürfe wurden von ihm wie stets in Spiegelschrift beschrieben. Auch hier haben wieder Flugphänomene in der Natur, den Menschen dazu inspiriert, seine Sehnsucht, selbst fliegen zu können, mit Hilfe der Technik umzusetzen.

1779 warf Étienne Jacques de Montgolfier einen an einem Fallschirm hängenden Hammel von einem Ballon ab – sein Versuch verlief erfolgreich. Den ersten nachweisbar erfolgreichen Fallschirmabsprung eines Menschen wagte S. Lenormand 1783, wobei aber auch das Jahr 1797 als Jahr des ersten Fallschirmabsprungs genannt wird. Hier sprang André Jacques Garnerin erstmals aus einer Höhe von ca. 1000 m mit einem Fallschirm. Es gibt allerdings auch Vermutungen, dass Fausto Veranzio schon ca. 1616 einen Fallschirm tatsächlich ausprobierte.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts entwickelten Kätchen Paulus und H. Lattemann den modernen, zusammenlegbaren Fallschirm. 1911 erfand G. J. Kotelnikow den Rückenfallschirm; eine bessere Verpackung für Fallschirme lieferte O. Heinicke 1913.

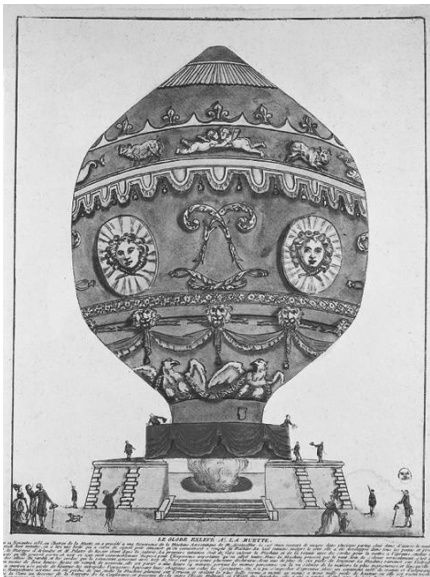
Die häufigen Abschüsse von Ballonbeobachtern zu Beginn des ersten Weltkriegs sorgten für die breite Einführung des Fallschirms.

Den seit 1964 verwendeten Gleitfallschirm (besitzt eine rechteckig gewölbte Fläche, die eine Auftriebskraft erzeugt) entwickelte D. Jalbert.

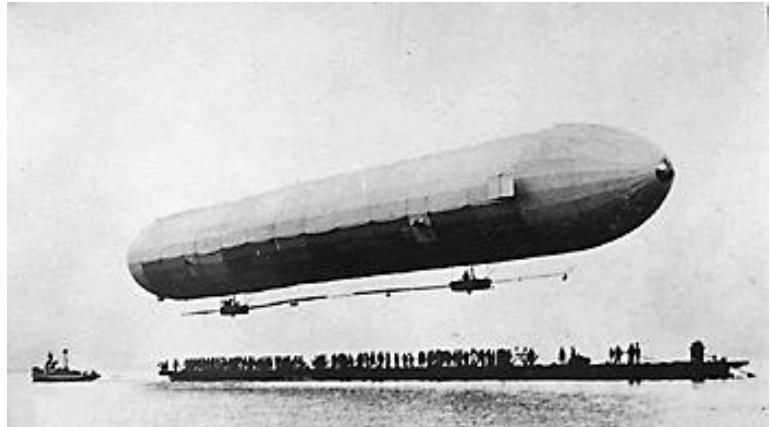
Die erste Realisierung des Fliegens gelang mit Hilfe von Geräten „leichter als Luft“:

Mit einem Heißluftballon, gebaut von den Brüdern Montgolfier, erhoben sich 1783 erstmals Menschen über die Erde. Diese Ballone und die wasserstoffgefüllten „Charlieren“, benannt nach dem französischen Physiker Jacques Charles) hatten allerdings den großen Nachteil, unkontrolliert im Luftmeer zu treiben, da nur eingeschränkte vertikale Kontrolle möglich war. Ballone ohne eigenen Antrieb bewegen sich mit dem Wind und lassen sich kaum in ihrem Kurs beeinflussen. Erst ein angetriebener Ballon, ein Luftschiff, kann durch Ruder gesteuert werden.

Nach Erfindung des Verbrennungsmotors und der Luftschaube entwickelte man die Starrluftschiffe oder Zeppeline. Bei diesen wird der zigarrenförmige Auftriebskörper durch ein fachwerkartiges Metallgerüst gebildet, das mit Tuch bespannt und mit leichtentzündlichem Wasserstoff in getrennten Gassäcken gefüllt ist. Am Ende des Auftriebskörpers befindet sich ein Leitwerk mit Seiten- und Höhenrudern. Für Besatzung und Passagiere ist eine Gondel fest mit dem Auftriebskörper verbunden. Die Triebwerke mit den Luftschauben befinden sich in separaten Triebwerksgondeln.



Heißluftballon der Brüder Montgolfier



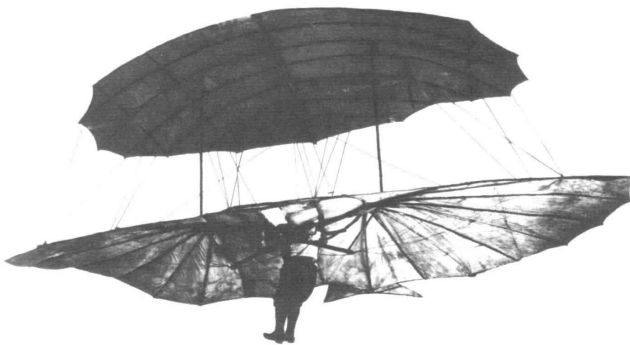
Zeppelin

Nach der Explosion des deutschen Zeppelins „Hindenburg“ in Lakehurst, USA, 1937 ruhte der Bau von Starrluftschiffen über fünfzig Jahre lang. Heute werden wieder Starrluftschiffe entwickelt und gebaut. Sie sollen z.B. für lang dauernde Überwachungsflüge (z. B. im Küstenschutz) eingesetzt werden, wobei der geringe Treibstoffverbrauch vorteilhaft ist. Die neuartigen Zeppeline haben eine Heliumfüllung und bewegliche Propellertriebwerke, die eine größere Beweglichkeit des Luftschiffes ermöglichen.

Die Technik von Prallluftschiffen (Blimps) liegt zwischen der von Gasballonen und Zeppelinen. Sie haben einen zigarren- oder tropfenförmigen Auftriebskörper, jedoch ohne Metallgerüst. Die Stromlinienform ist nur bei prall gefülltem Auftriebskörper gegeben. Die Passagiergondel hängt dicht am Auftriebskörper. An der Gondel sind auch die Triebwerke befestigt. Gegenüber Starrluftschiffen ergibt sich damit eine schlechtere Manövrierbarkeit und ein höherer Geräuschpegel für die Passagiere. Prallluftschiffe werden seit langer Zeit in kleinen Stückzahlen gebaut und vor allem für Rundflüge und Werbung eingesetzt.

Die lange Geschichte der Realisierungsversuche des Traums vom Fliegen trat jedoch Ende des 19. Jahrhunderts in eine konkretere Phase. Techniker und Industrielle stiegen in den Bau von Flugmaschinen ein, mit Experimenten versuchte man das Wesen des Auftriebs zu verstehen.

Am erfolgreichsten war der deutsche Flugpionier Otto Lilienthal. Er ging das Flugproblem wissenschaftlich an und führte systematische Untersuchungen über das Wesen des Auftriebs durch, indem er die Flugtechnik von Vögeln betrachtete. Lilienthal erprobte ab 1891 erfolgreich seine leichten, motorlosen Gleitflieger auf einem eigens aufgeschütteten „Fliegeberg“ bei Berlin. Seine Fluggeräte waren schon so ausgereift, dass er von seinem „Normal-Segelapparat“ einige Exemplare verkaufen konnte.

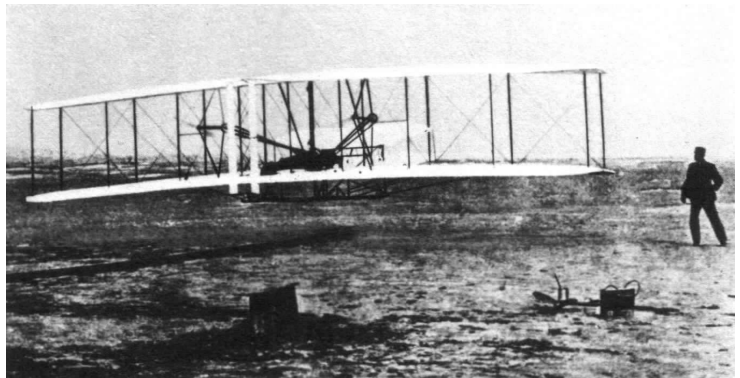
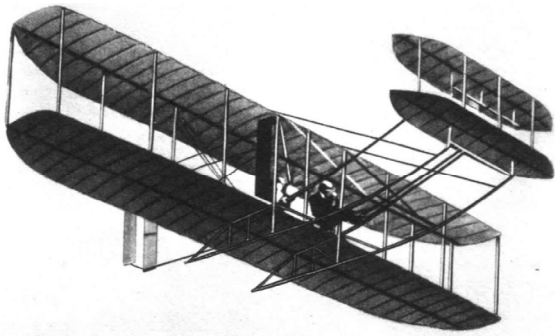


Otto Lilienthal bei seinen Flugversuchen

Auch Lilienthal kam – wie Leonardo – auf die Idee, den Gleitflug seiner Apparate durch Flügelschläge zu verlängern und konstruierte aus diesem Grund einen Schlagflügelapparat (Ornithopter), dessen Flügelspitzen wie die Schwungfedern eines Vogelflügels lamellenartig gefächert waren. Auch mit einem Einzylinder-Kohlensäuremotor – einen geeigneten Benzinmotor gab es noch nicht – kam es zu keinem erfolgreichen Versuch dieses Flugapparates. Einige der um 1900 arbeitenden Flugpioniere, wie etwa Pilcher in Großbritannien oder Chanute in den USA, bauten auf seinen Forschungen auf. Auch wenn das Phänomen des Auftriebs nun schon verstanden wurde, blieb doch das wichtigste Problem der frühen Fliegerei lange ungelöst: die Steuerbarkeit des Apparats um alle drei Achsen. Dass Höhen- und Seitensteuer nötig waren, erkannten fast alle Erfinder, doch erst die Brüder Wright führten eine funktionierende Querrudersteuerung ein. Sie bauten eine Verwindungsmöglichkeit der Tragflächen, sodass sie die Maschine wieder auf Kurs bringen konnten, wenn sie durch Böen ihre Stabilität verloren hatte. Lilienthal hatte dies durch die Verlagerung seines Körpergewichts erzielen wollen; diese wenig wirksame Methode hatte wahrscheinlich seinen Tod verschuldet.

Die Brüder Orville und Wilbur Wright waren schon früh fasziniert von allem Mechanischen. Sie bauten und verkauften Druckmaschinen ebenso wie Fahrräder, bevor sie mit dem „Drachenflug“ experimentierten. Ab 1900 erprobten sie Flugmaschinen auf einer vor dem amerikanischen Bundesstaat North Carolina gelagerten Sandinselkette. Die beiden Brüder waren keine Dilettanten: Sie kannten die Fachliteratur genau, kannten auch die Flugversuche Otto Lilienthals in Deutschland und die ihrer amerikanischen Konkurrenten wie die Gustav Weißkopfs, der 1901/02 vermutlich erfolgreich, aber folgenlos flog. Dabei war ihr Aufwand recht gering, was nicht heißt, dass ihr Flugapparat primitiv war: Sie hatten sogar Windkanalversuche vorgenommen. Die Luftschrauben mussten von ihnen ebenso entworfen und gebaut werden wie der Motor. Dieser war 12 PS stark und nur 65 Kilogramm schwer, ein für damalige Verhältnisse sensationeller Leichtbau.

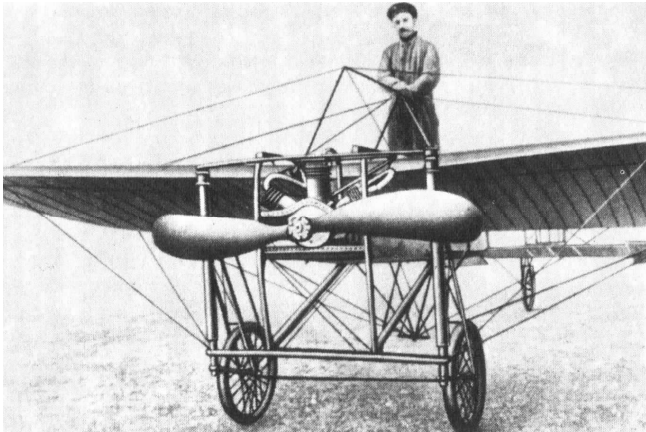
Die Wrights begannen ihre Flugversuche in einem glücklichen Moment, in dem der technische Fortschritt reif dafür war: Erst um die Jahrhundertwende waren Leichtbau und die Technologie moderner Verbrennungsmotoren verfügbar.



Flugversuche der Brüder Wright

Dann kam der große Tag: Am 17. Dezember 1903 hob der „Flyer“, ein Doppeldecker mit vorn liegendem Höhensteuer, Orville Wright für 12 Sekunden in die Luft. Dass der motorisierte Flug tatsächlich gelungen war, glaubte die Weltöffentlichkeit anfangs nicht, obwohl er fotografiert worden war. Für die Presse waren die Wrights nicht die *flying* (fliegenden), sondern die *lying* (lügenden) Brüder. Erst die Vorführung eines weiterentwickelten „Flyers“ in Europa im Jahr 1908 geriet zum Triumph und löste eine Welle der Flugbegeisterung aus: Viele europäische Flugpioniere fühlten sich nun bestätigt und in ihren Bemühungen bestärkt.

Insbesondere die erfolgreiche Überquerung des Ärmelkanals durch Louis Blériot 1909 zeigte der Welt die Leistung der Flugmaschinen und erzeugte in Europa einen unvorstellbaren Enthusiasmus.



Louis Blériot



Ganzmetallflugzeug

Danach wurden monatlich Höhen-, Weiten- und Geschwindigkeitsrekorde gebrochen; in Überlandflügen, Rekordjagden und Luftrennen steigerte man die Leistungen der Flugmaschinen. Waren anfangs noch Flüge von einigen Minuten sensationell, so flog Maurice Farman in knapp vier Stunden schon 180 km weit.

Doch natürlich forderte die frühe Luftfahrt Opfer. Viele Maschinen waren instabil, schwer zu beherrschen, zu leicht gebaut und hatten unzuverlässige Motoren. Zudem besaßen manche Flugpioniere nur unzulängliche Kenntnisse der Aerodynamik.

Nicht nur solide Konstrukteure widmeten sich der Verbesserung der Aeroplane und ihrer Antriebsmotoren, auch viele Abenteurer und technikbegeisterte Dilettanten lernten fliegen.

Technisch waren viele Fluggeräte experimentell: Bambus und Holzleisten, Leinen zur Tragflächenbespannung und Stahldrähte mussten leichte, stabile Tragwerke bilden, ein Ziel, das keineswegs immer erreicht wurde. Weiterentwickelte Konstruktionen verwendeten formverleimtes Sperrholz oder Stahlrohre, ab 1915 auch Vollmetall. Der Dichter Karl Vollmoeller besang 1910 das Flugzeug: „...spreitet ein neues Fabeltier die Schwingen / Von leichtem Linnen, dünnem Holz und Rohr!« Wie Vollmoeller waren viele Künstler vom Flugzeug fasziniert. Es galt als Beispiel für ein neues »kentauresches Verhältnis«, eine Einheit von Mensch und Technik.

Die treibende Kraft hinter den Verbesserungen der Aeroplane waren jedoch weder Künstler noch Sportler oder Techniker, sondern vor allem die Militärs. In den europäischen Staaten interessierten sich alle Armeen für den neuen Blick von oben, dem feindliche Truppenansammlungen und Marschbewegungen nicht verborgen bleiben konnten: Das Flugzeug sollte als „fliegendes Auge“ fungieren. Das Militär baute schon bald auf die Aufklärung aus der Luft, finanzierte zuverlässige Maschinen und prämierte leistungsfähige Flugmotoren nationaler Hersteller. Ursprünglich hatten die Militärs auf eine andere Flugtechnologie gesetzt, auf die Luftschiffe des Grafen Zeppelin. Dessen „deutsches“ Luftschiff wurde gerne gegen den „welchen“ Aeroplan ausgespielt. Doch die brandgefährdeten Luftschiffe waren zur Kriegführung wenig geeignet.

Schon bald wurde aus den fliegenden Augen des Heeres eine Waffe. Ab 1917 führten mehrmotorige deutsche Bomber bereits einen Krieg gegen die britische Zivilbevölkerung, während „Schlachtflugzeuge“ in die Grabenkämpfe der Westfront eingriffen. Die Jagdpiloten des Ersten Weltkriegs, die neuen Helden des „technoromantischen Abenteuers“, kämpften und starben in ihren hoch entwickelten Maschinen in vermeintlich ritterlichen Turnieren der

Lüfte, während unter ihnen der anonyme Massentod der Materialschlacht herrschte. Als einer der bekanntesten sei hier Manfred Freiherr von Richthofen genannt der „rote Baron“ erwähnt. Unmittelbar nach Kriegsende begann die zivile Luftfahrt. Sie baute auf den technischen Fortschritten der Kriegszeit auf. Geschlossene Ganzmetallflugzeuge mit Motoren für große Höhen, bald auch zuverlässigere Eindeckermaschinen flogen für die zahlreichen neu gegründeten Luftfahrtgesellschaften.

Ehemalige Kriegersflieger pilotierten nicht nur Passagier- und Postflugzeuge, sondern sorgten mit „Luftzirkus“-Vorführungen für weitere Popularität der Fliegerei. Charles Lindbergh bezwang 1927 allein den Nordatlantik, während deutsche „Wal“-Flugboote die Südamerikaroute erschlossen.

Doch während die neuen Helden der weltumspannenden Flüge gefeiert wurden, rüsteten die Militärs schon für einen neuen Krieg, der diesmal das Potenzial der Bedrohung aus der Luft voll realisieren sollte. Die Bomberflotte des nationalsozialistischen Deutschland führte Krieg gegen die Zivilbevölkerung von Guernica, Rotterdam und London, bevor die alliierten Geschwader die deutschen Großstädte in Trümmer legten. Die Atombomben von Hiroshima und Nagasaki warf der damals modernste Boeing-Bomber ab. Bei Orville Wrights Tod im Jahr 1948 war seine Erfindung nicht nur wahrhaft weltumspannend geworden, sondern hatte letztlich auch den verheerendsten Krieg der Geschichte entschieden.

Während des Krieges war in Zusammenhang mit den gigantischen Transportaufgaben, vor allem der Amerikaner, ein weltumspannendes Luftverkehrsnetz – mit Flugplätzen, Funk- und Flugsicherungsanlagen – entstanden, das jetzt für den zivilen Luftverkehr genutzt werden konnte. Viermotorige Transportflugzeuge, aus Militärtransportern weiterentwickelt, wie die Douglas *DC 6* und die *Lockheed Super Constellation*, überflogen ab 1955 nonstop in routinemäßigem Verkehrsdienst mit rund 90 Passagieren an Bord den Atlantik. Die Flugzeit betrug von Düsseldorf nach New York rund 13 Stunden, die Reisegeschwindigkeit rund 500 Kilometer pro Stunde. Die Druckkabine, in Langstreckenbomben erprobt, erlaubte einen ruhigen Flug in großen Höhen über dem Wettergeschehen.

1957 überrundete der Passagier-Luftverkehr auf der Atlantikstrecke den Schiffsverkehr. Die Gesamtzahl der Passagiere lag damals auf der Nordatlantikstrecke über zwei Millionen.

1955, mit Erteilung der Souveränität, durften auch in Deutschland wieder Flugzeugbau und Luftverkehr betrieben und die Lufthansa wieder gegründet werden.

Das erste Großflugzeug der neuen Generation, schon in der äußeren Formgebung durch den neuartigen Pfeilflügel charakterisiert, war der Stratosphärenbomber Boeing *B 47*. Aus dieser Entwicklungslinie folgte dann auf militärischer Seite der Bomber Boeing *B 52*, das wichtigste Flugzeug der amerikanischen strategischen Bomberflotte, und auf ziviler Seite die Boeing *707*, woraus die so überaus erfolgreiche Reihe der Verkehrsflugzeuge der Firma Boeing folgte: die *727*, *737* und das Großraumflugzeug, die *747*.

Die neue Verkehrsflugzeugtechnik vervielfachte die Produktivität des Verkehrsflugzeuges; diese ist gegeben durch Fluggeschwindigkeit, Passagierkapazität und Einsatzverfügbarkeit. Schon die *707* erreichte nahezu doppelte Reisegeschwindigkeit und doppelte Sitzplatzzahl (bis zu 180 gegenüber 90 der Propellerflugzeuge). Die Flugpreise sanken, und Wohlstand und Freizeit wuchsen in den Industrieländern beständig an. Der Luftverkehr, Geschäftsreisen und Flugtouristik, erlebten ab den sechziger Jahren einen Boom ohne gleichen. Die Flugzeugindustrie antwortete mit Großraumflugzeugen: Boeing mit der *747* (heute über 500 Sitzplätze), Douglas mit der *DC 10* (225-380 Plätze) und

Lockheed mit der *L 1011 Tristar* (256-400). Das Projekt eines militärischen Großtransporters (heute die Lockheed *C-5 Galaxy*) hatte allerdings den eigentlichen Anstoß dazu gegeben.



Boeing 747 (Jumbojet)



Concorde

Mit einer Reisegeschwindigkeit von rund 2 200 Kilometern pro Stunde ist der französisch-britische Überschalljet Concorde das schnellste Passagierflugzeug der Welt. Seit 1976 ist es im Linieneinsatz.

Bedingt durch den gewaltigen Aufwand für die Rüstung und den riesigen inneramerikanischen Markt erlangten die USA in wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Hinsicht eine erdrückende Übermacht sowohl in der Flugzeugentwicklung als auch im Luftverkehrsmarkt und zwangen so die Europäer, wollten sie nicht vollends ins Hintertreffen geraten, zu einem immer weiter gehenden Zusammenschluss in Forschung und Industrie.

Ende der sechziger Jahre entstand, mit dem Ziel, ein eigenes, europäisches Großraumverkehrsflugzeug zu bauen, die *Airbus Industrie*. Am 18. Dezember 1970 wurde der Gesellschaftsvertrag von der französischen *SNIAS* und der deutschen *Airbus GmbH* unterschrieben. Später kamen noch die spanische *CASA*, die holländische *Fokker* und die *British Aerospace* hinzu. Das erste Flugzeug, der Airbus A 300 (Erstflug 1972), war das erste Großraumflugzeug mit nur zwei Triebwerken und machte dadurch den amerikanischen dreistrahligen Flugzeugen erfolgreich Konkurrenz. Der Notwendigkeit gehorchend, eine ganze Familie anbieten zu können, folgten die kleineren Airbusse A 310 (1982), A 320/21/19 (1987) und die Langstreckenversionen A 330/340 (1991). Als revolutionäre, aber auch umstrittene Innovation hielt mit dem A 320 der nur mit einer Hand zu bedienende „side stick“ als Hauptsteuerorgan Einzug in das Cockpit von Verkehrsflugzeugen und löste die traditionelle Steuersäule ab; die Betätigung der Ruder und Klappen erfolgte nicht mehr über Drahtseile, sondern ausschließlich über elektronische Signale (fly by wire). Zwischen den Firmen, bzw. zwischen den USA und Europa, entspann sich ein brutaler Wettkampf, bei dem weniger bessere Technik als vielmehr politische und wirtschaftliche Machtfragen die entscheidende Rolle spielten – so geht es z. B. um die Grundfrage, inwieweit der Staat direkt oder indirekt Entwicklungsprojekte unterstützen darf. Sowohl die Luftverkehrsgesellschaften als auch die Herstellerunternehmen stehen vor gewaltigen Investitionen, die kaum noch aus eigener wirtschaftlicher Tätigkeit finanziert werden können, da auch der Staat durch Liberalisierungs- und Deregulierungsgesetze massiv Einfluss ausübt und unvorhersehbare Risiken verursacht.

Neueste Entwicklung auf dem Markt für Passagierflugzeuge ist der Großraumjet A 380 von Airbus.



Airbus A 380



Wichtige Ereignisse aus der Geschichte der Luftfahrt (Auswahl)

- 1783 Erster Aufstieg eines Heißluftballons (Montgolfiere)
- 1785 Erste Überquerung des Ärmelkanals von England nach Frankreich durch J.-P. Blanchard und J. Jeffries in einem Wasserstoffballon
- 1804 L. J. Gay-Lussac erreicht im Ballon 7000m Höhe
- 1890) 96 Gleitflüge O. Lilienthals
- 1900 Erster Aufstieg eines Zeppelin-Luftschiffes, des LZ 1, von Manzell am Bodensee
- 1903 Erste Motorflüge der Brüder Wright
- 1909 Ärmelkanalüberquerung von L. Blériot
- 1915 Erstes Ganzmetallflugzeug von H. Junkers
- 1917 Streckenrekord von LZ 59 über 6757 km von Bulgarien bis Khartum in Afrika und zurück
- 1919 Erste Nordatlantiküberquerung durch J. W. Alcock und A. Whitten-Brown
- 1924 Erste Ost-West-Überquerung des Nordatlantiks durch LZ 126 unter H. Eckener
- 1927 Nordatlantiküberquerung von New York nach Paris durch C. A. Lindbergh im Alleinflug
- 1928 Erste Ost-West-Überquerung des Nordatlantiks im Flugzeug durch H. Köhl, G. von Hünefeld, J. Fitzmaurice
- 1929 Weltfahrt des LZ 127 „Graf Zeppelin“ unter H. Eckener
- 1929 Erstes Raketenflugzeug RAK 1 von J. Hatry, vorgeführt von F. von Opel
- 1932 A. Piccard erreicht in seinem Stratosphärenballon 16940m Höhe
- 1932 Beginn des regelmäßigen Liniendienstes über den Südatlantik durch LZ 127
- 1935 Beginn des Luftverkehrs mit Flugzeugen über den Pazifik
- 1936 Erster leistungsfähiger Hubschrauber Fw 61
- 1936 Beginn des regelmäßigen Flugdienstes über den Nordatlantik (Frankfurt | Lakehurst, New York) durch LZ 127 und LZ 129
- 1937 Brandkatastrophe des LZ 129 „Hindenburg“ in Lakehurst, 36 Tote. Ende der Verkehrsluftschiffahrt
- 1938 Im Segelflugzeug wird die Stratosphäre erreicht (11400m Höhe)
- 1939 Beginn des Luftverkehrs mit Flugzeugen über den Nordatlantik
- 1939 Erstflug des Raketenflugzeugs Heinkel He 176
- 1939 Erstes Flugzeug mit Strahltriebwerk Heinkel He 178
- 1947 Raketenflugzeug Bell X-1 überschreitet Schallgeschwindigkeit
- 1949 Umrundung der Erde (37523 km) ohne Zwischenlandung mit Flugbetankung
- 1952 Luftverkehr beginnt mit Strahlflugzeugen („Comet“)
- 1957 Planmäßiger Luftverkehr über den Nordpol
- 1957 Erster Senkrechtstarter
- 1967 Raketenflugzeug X-15 erreicht 7274 km/h
- 1970 Einführung der Großraumflugzeuge (Boeing 747)
- 1976 Eröffnung des Überschall-Luftverkehrs („Concorde“)
- 1978 Erste Überquerung des Nordatlantiks von USA bis Paris in einem Heliumballon
- 1981 Ärmelkanal wird von einem Solarkraftflugzeug überquert (S. Ptacek)

1981	Erste Überquerung des nordamerikanischen Kontinents von der West- zur Ostküste der USA (4047 km) mit einem Heliumballon
1981	Erste Überquerung des Pazifischen Ozeans von Japan bis Kalifornien mit einem Heliumballon in 3½ Tagen
1986	Umrundung der Erde (48152 km) in 9 Tagen durch D. Rutan und J. Yeager in dem Leichtflugzeug „Voyager“ nonstop und ohne Flugbetankung
1987	Der Airbus A320 wird als erstes Flugzeug mit der Fly-by-wire-Technik ausgestattet
1997	Wiederaufnahme des Zeppelin-Luftschiffbaus mit dem Prototyp LZ N07
1999	Erste Erdumrundung in einem Heliumballon in 19 Tagen durch B. Piccard und B. Jones
2002	Erste Erdumrundung in einem Heliumballon (Alleinfahrt) in 13 Tagen durch S. Fossett
2003	Ende des zivilen Überschallflugs mit der „Concorde“
2005	Der Airbus A 380 absolviert im April seinen Erstflug

Physikalische Grundlagen des Fliegens

Unter Fliegen versteht man die freizügige Bewegung von Körpern innerhalb der Lufthülle der Erde ohne direkte Stützung von der Erdoberfläche aus. Um diesen Zustand zu erreichen, muss die Erdanziehungskraft (Gravitation) durch eine Gegenkraft ausgeglichen bzw. überwunden werden. Diese Gegenkraft, die das Fliegen ermöglicht, bezeichnet man als Auftriebskraft (ebenfalls überwunden wird die Schwerkraft der Erde auch durch Schubkräfte, wie sie in Raketen erzeugt werden; siehe unten).

Beim Auftrieb unterscheidet man zwei Arten:

A. Aerostatische Auftriebskraft

Der aerostatische Auftrieb F_A ist eine der Schwerkraft entgegengerichtete Kraft, die ein Körper auf Grund der senkrecht zu seiner Oberfläche wirkenden Druckkraft erfährt. Diese Druckkraft nimmt mit zunehmender Höhe des ruhenden umgebenden Gases ab.

Die Kraft, die ein Körper dabei erfährt, ist nach dem archimedischen Prinzip gleich dem Gewicht des vom Körper verdrängten Gases

$$F_A = \rho \cdot g \cdot V$$

wobei ρ die Dichte des Gases, g die Erdbeschleunigung und V das Volumen des Körpers ist.

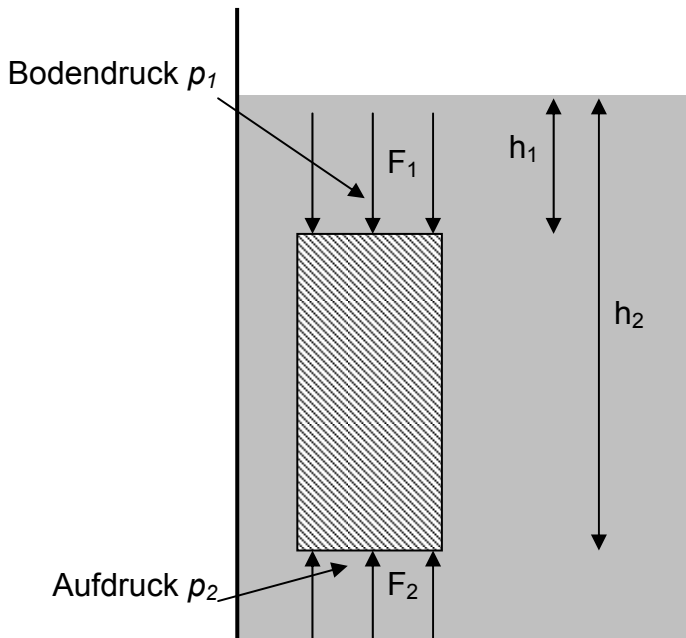
Ist der aerostatische Auftrieb

- gleich dem Gewicht F_G des Körpers, dann schwebt dieser
- größer als das Gewicht F_G des Körpers, dann kommt es zu einer Aufwärtsbewegung, die so lange anhält, bis der Gasdruck und damit die Dichte des umgebenden Gases abnimmt und es in einer bestimmten Höhe zum Schweben kommt

Zur Aufwärtsbewegung kommt es, wenn der Körper ein leichteres Gas als Luft enthält. Solche leichten Gase sind Wasserstoff (H) und (He), aber auch erwärmte Luft.

Die eben beschriebenen physikalischen Vorgänge gelten entsprechend auch für Flüssigkeiten. Hier spricht man dann vom statischen Auftrieb, wenn $F_A = F_G$ und vom Schwimmen bei $F_A > F_G$.

In Gasen ist die Auftriebskraft von Körpern auf Grund der wesentlich geringeren Dichte sehr viel kleiner als in Flüssigkeiten.
Anhand der folgenden Skizze kann man sich das Zustandekommen des statischen Auftriebs klarmachen.

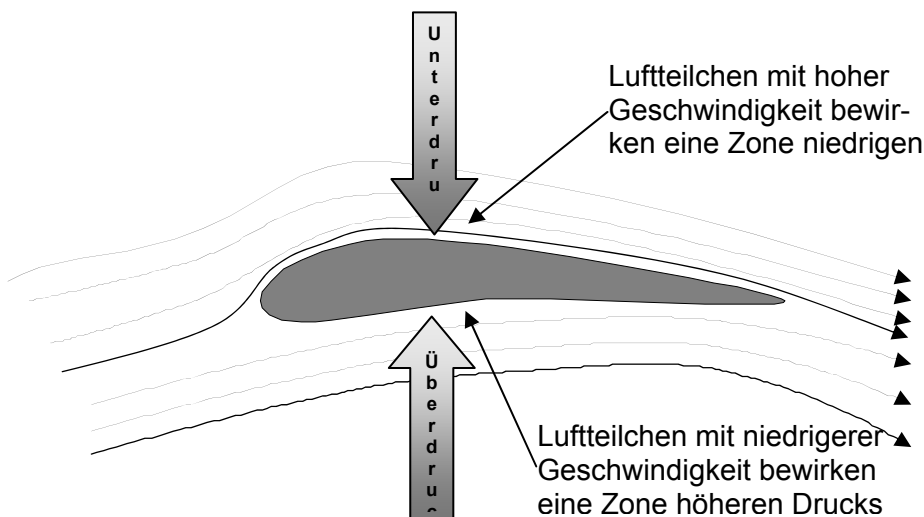


Mit der Tiefe nimmt der Schweredruck einer Flüssigkeit zu. Er ist überall gleich, so dass Bodendruck, Aufdruck und Seitendruck in jeder Tiefe gleich groß sind. Die Druckkräfte, die auf die Seitenflächen eines Körpers wirken, heben sich gegenseitig auf. Der Auftrieb eines Körpers kommt dadurch zu Stande, dass der Schweredruck mit der Tiefe zunimmt. Der Aufdruck p_2 ist größer, da die Tiefe, in der p_2 wirkt, um die Länge $h_2 - h_1$ größer ist als die Tiefe h_1 , die den Bodendruck p_1 bewirkt. Aus der Differenz der beiden Drücke $p_2 - p_1$ ergibt sich die Auftriebskraft F_A , d.h. $F_2 - F_1$.

B. Aerodynamischer Auftrieb

Wird ein entsprechend gestalteter Körper von einem Gas umströmt, dann wirkt senkrecht zur Strömungsrichtung des Gases – der Schwerkraft entgegengerichtet – eine Kraft. Sie wird durch unterschiedliche Druckverteilung längs der Oberfläche des Körpers verursacht. Diese nach oben wirkende Kraft bezeichnet man als aerodynamischen Auftrieb.

Bei geeigneter Formgebung des Profils ist an der Oberseite die Strömungsgeschwindigkeit größer als an der Unterseite. Auf Grund der Krümmung der Oberseite bewegen sich hier die Luftteilchen mit höherer Geschwindigkeit und gelangen so schneller an das Ende des Profils. Dadurch entsteht nach Bernoulli auf der Oberseite ein Unterdruck, während auf der Unterseite ein Überdruck entsteht, wodurch das Profil nach oben gedrückt wird.



Mathematisch werden diese Druck-Vorgänge in einer Strömung mit Hilfe der *bernoullischen Gleichung* beschrieben:

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 = p_0$$

wobei p_1 der statische Druck an Stelle 1, v_1 die Geschwindigkeit des strömenden Mediums an Stelle 1, ρ die Dichte des Mediums und p_0 der Gesamtdruck ist; für p_2 und v_2 gilt

Entsprechendes. Der Ausdruck $\frac{1}{2} \rho v^2$ bezeichnet den Staudruck.

Es gilt daher

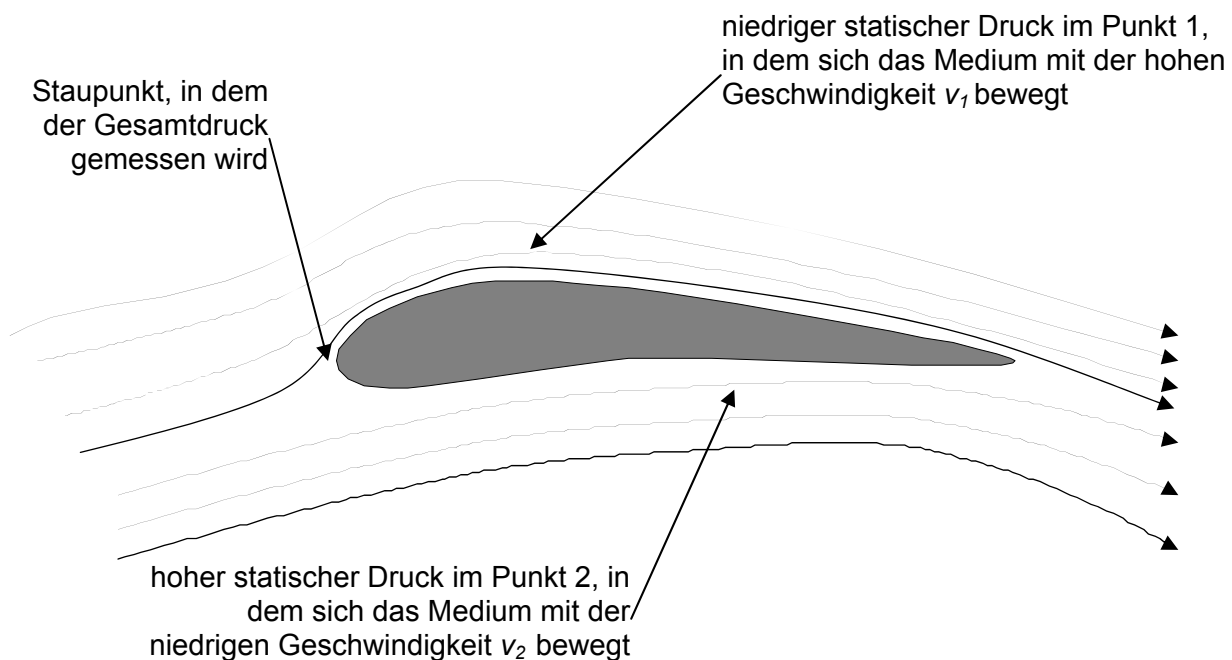
$$\text{statischer Druck} + \text{Staudruck} = \text{Gesamtdruck}$$

Unter dem Gesamtdruck versteht man den Druck, der am Staupunkt eines Körpers entsteht. Der Staupunkt ist der Punkt auf der Oberfläche eines gleichförmig umströmten Körpers, auf den das strömende Medium direkt auftrifft und bei dem die Geschwindigkeit des Mediums $v = 0$ ist bzw. auf null verzögert wird. Als statischen Druck bezeichnet man den Seitendruck in einem strömenden Medium. Aus der Differenz von Gesamtdruck und statischem Druck errechnet sich der Staudruck.

$$p_{\text{Stau}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_0 - p_1 \text{ bzw. } p_{\text{Stau}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 = p_0 - p_2$$

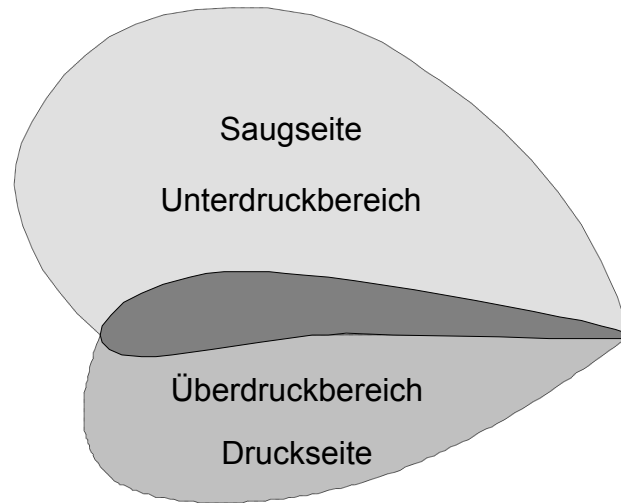
Aus der *bernoullischen Gleichung* erkennt man:

Je höher der Staudruck ist, desto größer ist die Strömungsgeschwindigkeit v des strömenden Mediums und desto geringer wird der statische Druck.



Das Profil wird von unten hoch gedrückt und von oben angesaugt. Man bezeichnet daher die Unterseite als „Druckseite“ und die Oberseite als „Saugseite“.

Die Vorgänge an einem umströmten Profil können mit Hilfe des folgenden Druckverteilungsdiagramms verdeutlicht werden.



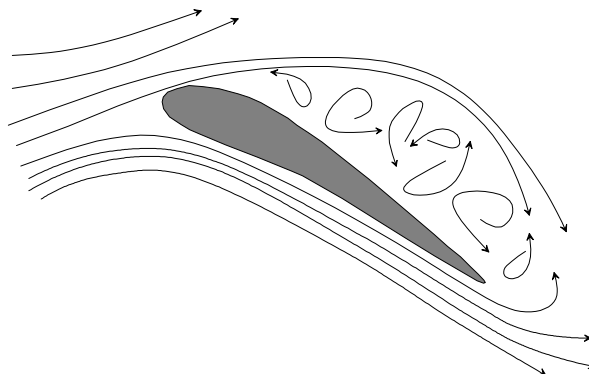
Der aerodynamische Auftrieb F_a lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$F_a = c_a \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

wobei c_a der Auftriebsbeiwert, (abhängig von der Form des Tragflügelprofils, vom Anstellwinkel des umströmten Tragflügels und von der Anströmgeschwindigkeit) ρ die Dichte des umströmenden Mediums, v die Anströmgeschwindigkeit des Mediums und A die Fläche der umströmten Körperunterseite ist (der Anteil $\frac{1}{2} \rho v^2$ ist identisch mit dem Staudruck).

An der obigen Formel sieht man, dass der Auftrieb mit zunehmender Geschwindigkeit, d.h. mit dem Quadrat der Anströmgeschwindigkeit, zunimmt; bei doppelter Anströmgeschwindigkeit vervierfacht er sich, bei dreifacher Anströmgeschwindigkeit verneunfacht er sich usw. Weitergehende Informationen finden sich u.a. unter www.flugtheorie.de/15SCHULE.HTM. Eine Strömung, bei der die einzelnen Schichten ohne Wirbelbildung aneinander vorbeigleiten, bezeichnet man als laminare Strömung.

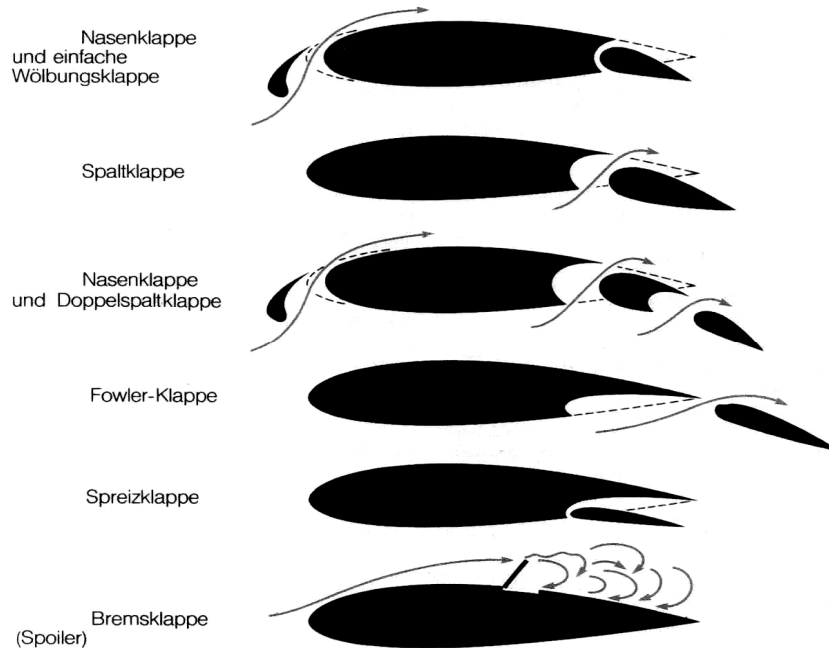
Wird die laminare Strömung instabil, dann kann sie in eine turbulente Strömung umschlagen, d.h., die sich vorher geordnet bewegenden Schichten gehen in eine ungeordnete Bewegung über.



Dies geschieht, wenn der Anstellwinkel des angeströmten Profils immer stärker steigt; der Auftrieb erreicht dann bei einem bestimmten Punkt einen maximalen Wert. Bei weiterer Vergrößerung des Anstellwinkels reißt aber die laminare Strömung auf der Saugseite – der Seite, auf der ein Unterdruck herrscht – ab und es kommt zu Turbulenzen.

Das Abreißen der Strömung bei einem solchen überzogenen Flugzustand (engl. stall) führt zum raschen Zusammenbrechen des Auftriebs und zu einem raschen Höhenverlust bzw. zum seitlichen Abkippen eines Flugzeugs.

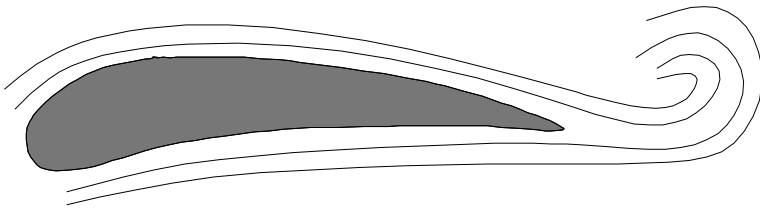
Um Auftrieb und Widerstand eines Flugzeugs zu beeinflussen, sind an den Tragflächen Klappen angebracht, mit deren Hilfe dies bewerkstelligt werden kann.



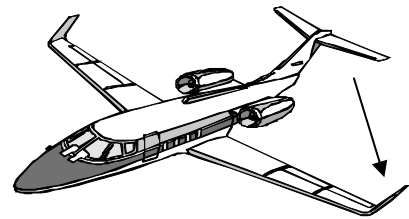
Die eben geschilderten Vorgänge, die den aerodynamischen Auftrieb nur mit Hilfe des *Bernoulli-Effekts* erklären, geben diesen Sachverhalt nur sehr stark vereinfacht und verkürzt wieder. In Wirklichkeit sind die Vorgänge, die zu einem so starken Auftrieb führen, dass ein Flugzeug fliegt sehr viel komplizierter und komplexer und lassen sich nicht allein mit der *bernoullischen Gleichung* erklären. Im Folgenden werden weiterführende Erklärungen kurz angerissen.

Auf Grund der hohen Strömungsgeschwindigkeit der Luft mit der die Tragflächen eines Flugzeugs umströmt werden, kommt es wegen des Flügelprofils auf der Oberseite zu einer schnelleren Strömung als auf der Unterseite, wobei sich oben ein Unterdruck ausbildet. Dies gilt aber nur für sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten. Bei ansteigender Strömungsgeschwindigkeit bilden sich an der Hinterkante des Flügelprofils Wirbel aus, die um den Tragflügel rotieren. Diese *Anfahrtswirbel* sind die Auslöser des eigentlichen Auftriebs. Sie entstehen dadurch, dass an der Profilhinterkante zwei Strömungen, nämlich die obere und die untere mit gleichem Druck, aber unterschiedlicher Geschwindigkeit an der *Trennungsfläche* zusammentreffen.

Der *Anfahrtswirbel* löst dann eine Wirbelströmung um den Tragflügel aus, die als gebundener „tragender“ Wirbel bezeichnet wird. Durch den Unterdruck auf der Oberseite und den Überdruck auf der Unterseite – hervorgerufen u.a. durch die Zirkulation des „tragenden“ Wirbels – kommt es zum dynamischen Auftrieb.

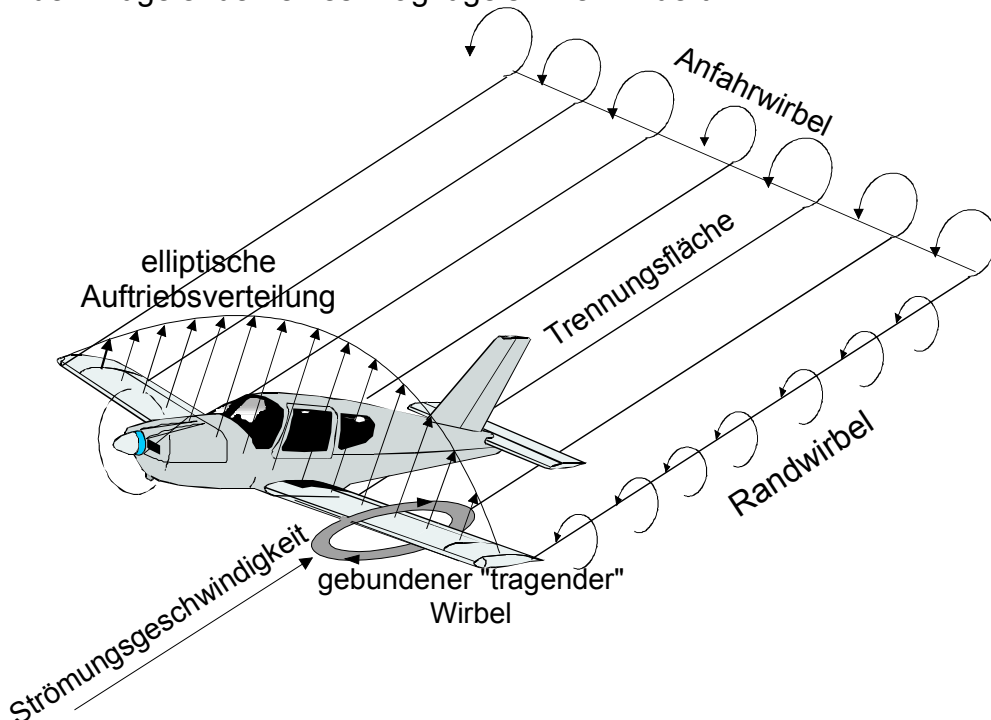


Wirbelbildung an der Profilhinterkante



Winglet

An den Tragflügelenden, wo der Druckunterschied zwischen Flügeloberseite und Flügelunterseite auf Null abnimmt, bilden sich Randwirbel, die einen „induzierten Widerstand“ hervorrufen. Dieser Widerstand wird mit Hilfe sogenannter *Winglets* – das sind aufwärts gerichtete Hilfsflügel an den Flügelenden eines Tragflügels – vermindert.



Eine weitere Erklärung, warum ein Flugzeug fliegt, kann darin gesehen werden, dass der Tragflügel eines bewegten Flugzeugs bei Vorwärtsbewegung die Luft, die kompressibel ist, abwärts stößt und wie bei einer Feder oder bei einem Tennisball, der auf die Schlägerfläche prallt, stark zusammendrückt. Diese zusammengedrückte Luft drückt dann Sekundenbruchteile später, wenn sie wieder ihren ursprünglichen Raum einnimmt, gegen den Tragflügel und soll so den Auftrieb bewirken. Physikalisch gesehen findet hier ein elastischer Stoß nach dem Prinzip von $\text{actio} = \text{reactio}$ statt.

Nach all diesen Erklärungen wird der Satz: „Das Geheimnis des Fliegens ist kein einfaches!“ verständlich.

Mit Hilfe der Adaptronik – das ist ein neues Gebiet der Technik, das sich mit Materialien bzw. Systemen beschäftigt, die sich selbstständig wechselnden Bedingungen anpassen – versucht man Flügel zu entwickeln, die ihre Form automatisch den sich ständig ändernden aerodynamischen Bedingungen während eines Fluges anpassen (vgl. dazu Ergänzung).

Historische Grundlagen des Raketenflugs

Erfunden wurde die Feststoffrakete Anfang des 13. Jahrhunderts von den Chinesen. Der erste militärische Einsatz von Raketen soll der Überlieferung zufolge 1232 bei der Belagerung einer Stadt in China stattgefunden haben. Über die Araber wurden die Raketen im 13. Jahrhundert auch in Europa bekannt. Allerdings nutzte man sie nicht nur zu militärischen Zwecken. Besonders im 17. Jahrhundert dienten kleinere Ausführungen als Feuerwerkskörper.

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts entwickelte der britische Artillerieoffizier William Congreve eine nach ihm benannte Feststoffrakete, die eine Reichweite von etwa 2 000 Metern hatte. Dieser Typ enthielt einen Blechzylinder, in dem eine drei Kilogramm schwere Ladung explosiven Materials befördert wurde. Der zur Flugstabilisierung verwendete Stock war vier Meter lang, und das Gesamtgewicht lag bei rund 14 Kilogramm.

In den darauf folgenden Jahrzehnten stellte man in einigen Armeen Raketenbrigaden auf. Diese verloren allerdings mit der technischen Weiterentwicklung und Verbesserung der Artillerie an Bedeutung. Die meisten dieser Brigaden wurden bereits um 1870 wieder aufgelöst. In der Folgezeit blieben die Raketen nur in den Bereichen Feuerwerkskörper, Seenot (Signalraketen) und im Walfang von Bedeutung.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts nahm das Interesse an Raketen wieder zu, wozu auch die Romane von *Jules Verne* beitrugen. Im Mittelpunkt stand dabei die theoretische und experimentelle Raketenforschung. Einige Wissenschaftler, wie z. B. der russische Physiker Konstantin *Eduardowitsch Ziolkowski*, schlugen vor, Raketen als Weltraumfahrzeuge zu nutzen.

Im 1. Weltkrieg verwendete man Raketen in erster Linie zur Signalgebung. Sie wurden außerdem von Flugzeugen auf militärische Aufklärungsballons abgeschossen. Zu jener Zeit experimentierte der amerikanische Physiker *Robert Goddard* mit Feststoffraketen und entwickelte eine Ausführung, die wissenschaftliche Messungen in den oberen Schichten der Atmosphäre vornehmen konnte. Diese Höhen ließen sich mit einem herkömmlichen Ballon nicht erreichen.

Zu den Raketenpionieren zählt auch der österreichische Physiker *Hermann Oberth* mit seinem Werk „Rakete zu den Planetenräumen“. Diese Pioniere wurden anfänglich verspottet, da sich viele ihrer Zeitgenossen nicht vorstellen konnten, dass eine Rakete auch im Vakuum des Weltraums fliegen könnte (die New York Times entschuldigte sich 1969 für einen Artikel im Jahre 1920, in dem sie R. Goddard wegen seiner Ideen, eine Rakete könne im Vakuum fliegen, verspottet hatte).

Zu den wenigen, die diese Gedanken ernst nahmen und versuchten, sie zu verwirklichen gehörte der deutsche Raketenforscher *Wernher von Braun*. Mit Mitgliedern des Vereins für Raumschiffahrt entwickelte beim deutschen Heereswaffenamt in Peenemünde während des zweiten Weltkriegs die ersten Großraketen mit flüssigen Treibstoffen (V-2).

Später war er Leiter des Apollo-Programms der NASA, mit dem den USA die erste Mondlandung gelang.

Physikalische Grundlagen des Raketenflugs

Um Satelliten, Raumsonden und Raumschiffe von der Erde in den Weltraum zu bringen, sind Kräfte erforderlich, die die Anziehungskraft der Erde überwinden. Das Gleiche gilt für Projektile, die sich innerhalb unserer Atmosphäre über große Entfernungen fortbewegen.

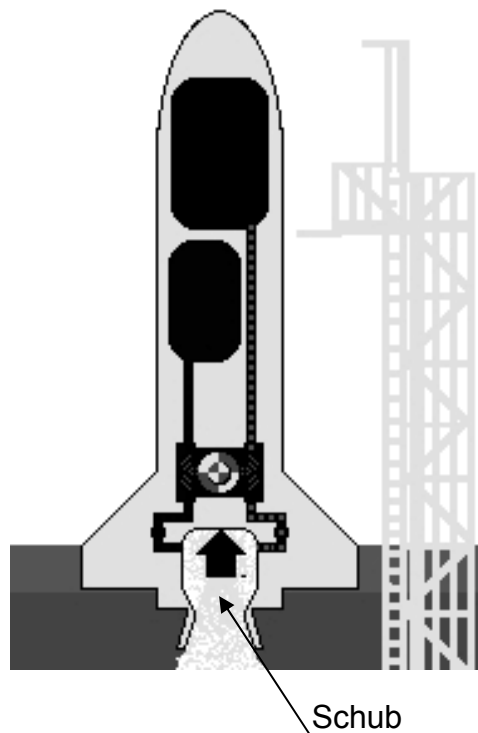
Diese Kräfte werden von Raketentriebwerken, in denen große Mengen Treibstoff verbrannt werden, erzeugt. Der *Impulssatz* oder *Impulserhaltungssatz* (3. Newton Axiom) ist die Grundlage der Raketentechnik bzw. jeder Raketenkonstruktion.

Es besagt:

Wirkt ein Körper *A* auf einen Körper *B* mit der Kraft F_1 ein, so wirkt der Körper *B* auf den Körper *A* mit der Kraft F_2 ein, die den gleichen Betrag, aber die entgegengesetzte Richtung hat, d.h. *actio* = *reactio*.

Schießt ein Jäger sein Gewehr ab, dann erfährt dieses einen Rückstoß. Das Produkt aus Geschossmasse m_1 und Geschossgeschwindigkeit v_1 ist dabei gleich dem Produkt aus der Gewehrmasse m_2 und der Rückstoßgeschwindigkeit v_2 . Diese Produkte bezeichnet man als *Impulse*, für die gilt $m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2$

Die in der Brennkammer einer Rakete erzeugten heißen Gase stehen unter hohem Druck und erhalten dabei einen *Impuls* in Höhe des Produktes aus Gasgeschwindigkeit v und ausströmender Gasmasse m . Die Wirkung dieses Drucks besteht einmal im einseitigen Ausströmen der Gase aus der Brennkammer und zum anderen in der Erzeugung von einem *Vortrieb*, *Rückstoß* oder *Schub* (*Schubkraft*), der die Rakete in Gegenrichtung des Ausströmens beschleunigt. Dabei ist es völlig gleichgültig, ob die Rakete sich in Wasser, Luft oder im luftleeren Raum befindet; sie benötigt für ihre Fortbewegung kein äußeres Medium.



Unter dem *Schub* F_S eines Raketentriebwerks versteht man die von dem Gasausstoß herrührende *Kraft* F_S , die die Rakete beschleunigt.

Sie berechnet sich aus der in der Zeit t verbrannten Treibstoffmasse m und der Ausströmgeschwindigkeit w der Verbrennungsgase.

$$F_S = \frac{m}{t} \cdot w$$

Vereinfacht gilt:

größere Ausströmgeschwindigkeit → größerer Schub → größere Endgeschwindigkeit

Die *ideale Endgeschwindigkeit* v_i einer Rakete hängt unter anderem ab von dem Verhältnis der Masse der vollgetankten Rakete m_0 zur Masse der leeren (trockenen) Rakete m_L und der Ausströmgeschwindigkeit der Verbrennungsgase w . Dieser Sachverhalt wird durch die *Raketengrundformel* von E. Ziolkowski ausgedrückt.

$$v_i = w \cdot \ln \frac{m_0}{m_L} \quad \text{oder} \quad v_i = w \cdot 2,3 \cdot \log \frac{m_0}{m_L}$$

Wird nach der Raketengrundgleichung die Endgeschwindigkeit einer konventionellen Einstufenrakete berechnet, so kommt man in keinem Fall auf die dafür notwendigen, zum Verlassen der Erdumlaufbahn, 40 000 km/h.

Diese Geschwindigkeit kann nur durch Verwendung von Mehrstufenraketen erreicht werden. Diese besitzen den entscheidenden Vorteil, ausgebrannte Stufen abzuwerfen, so dass diese nicht weiter mitbeschleunigt werden müssen.

1. Auftrieb in Flüssigkeiten

Hinweis: Um zu erkennen, dass Körper in Gasen (insbesondere in Luft) einen Auftrieb erfahren, ist es nötig, dass die Schüler zuerst den Auftrieb in Flüssigkeiten, d.h. in Wasser, kennen lernen. Flüssigkeiten werden von Schülern als stoffliche Körper wahrgenommen, während das bei Gasen i. Allg. nicht der Fall ist.

Damit Schüler den Auftrieb in Flüssigkeiten messen können, ist es erforderlich, dass sie im Gebrauch des Kraftmessers unterwiesen werden. Auf die Unterschiede zwischen Masse und Gewicht sollte an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

An Stelle der Digitalwaage kann auch eine Briefwaage verwendet werden, die aber bei den später folgenden Versuchen zum dynamischen Auftrieb nicht so empfehlenswert ist.

Versuch 1(SV)*

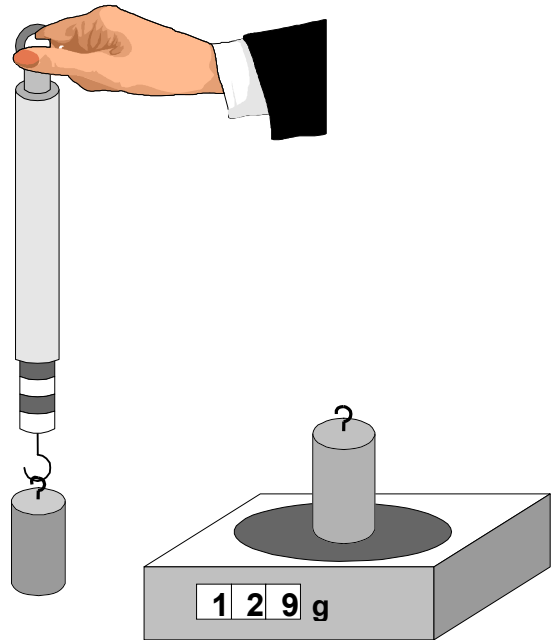
Aufbau

Kraftmesser (1 - 2 N), verschiedene Massestücke (je nach Kraftmesser bis zu 200 g), Waage

Durchführung

- a) Verschiedene Massestücke werden nacheinander an den Kraftmesser angehängt und die Zahlenwerte auf der Skala abgelesen und notiert.
- b) Die Massestücke werden mit einer Waage gewogen und die Zahlenwerte notiert. Sowohl die am Kraftmesser in Newton (N) als auch die mit der Waage ermittelten Werte in Gramm (g) werden nebeneinander in einer Tabelle notiert.

Körper	N	g
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		



Beobachtung

Je weiter die äußere Hülse des Kraftmessers herausgezogen wird, desto schwerer das Massestück und umgekehrt. Die Zahlen auf der Skala des Kraftmessers sind immer um das Hundertfache kleiner als die Gramm-Werte.

Erklärung

Die Einheit Newton gibt an, mit welcher Kraft ein Massestück angezogen wird. Ein Massestück von 100 g erfährt auf der Erde die Kraft von 1 Newton (gerundeter Wert). Ein Massestück von 1 g Gramm erfährt dementsprechend die Kraft von 0,01 N (gerundeter Wert). Die Newton-Werte müssen also mit 100 multipliziert werden, um herauszubekommen, welche Masse am Kraftmesser hängt.

Hinweis: Es sollte so lange gemessen und umgerechnet werden, bis die Schüler im Gebrauch des Kraftmessers sicher sind.

* SV - Schülerversuch, LV - Lehrerversuch

Versuch 2 (SV)

Aufbau

Kraftmesser, verschiedene Gegenstände, Waage, Zwirn

Durchführung

Wie Versuch 1, Schlinge aus Zwirnsfaden an den Gegenständen befestigen.

Beobachtung

Wie Versuch 1

Erklärung

Wie Versuch 1

Hinweis: Bei den folgenden Auftriebs-Versuchen, wo die Schüler quantitativ arbeiten, sollten die folgenden Punkte beachtet werden:

- *Ca. 1 – 2 Tropfen Spülmittel zur Herabsetzung der Oberflächenspannung des Wassers verrühren; Schaumbildung vermeiden.*
 - *Kraftmesser 1 - 2 N verwenden.*
 - *Gewichte für die Verdrängungsversuche je nach Art des Kraftmessers wählen*
 - *Messgefäße (Mensuren) bis 100 ml verwenden.*
 - *Vorschlag: Gut geeignet sind zylindrische Körper aus Aluminium, PVC und Buchenholz ($\varnothing$ 20 mm, Höhe 80 mm und $\varnothing$ 20 mm, Höhe 50 mm). Diese Körper können aus Rundstäben, die man im Fachhandel (vgl. Materialliste) kaufen kann, preiswert angefertigt werden. Zur Befestigung am Kraftmesser können entweder Schlingen aus Zwirnsfaden verwendet werden oder man bohrt Löcher in die Rundstabstücke und schraubt kleine Haken hinein. Erwirbt man diese Körper im Lehrmittelhandel, dann sind sie recht teuer (1 Satz ca. 25 – 30 €) und teilweise vom Volumen sehr klein. Der Vorteil dieser Körper besteht darin, dass ihr Volumen ca. 20 – 30 cm³ beträgt und ihre Auftriebskraft also gut messbar ist; außerdem passen sie in Messzylinder mit 100 ml Fassungsvermögen hinein.*
 - *Selbstverständlich können auch beliebige andere Körper verwendet werden. Es muss aber darauf geachtet werden, dass diese Körper einerseits nicht zu klein sind, da ansonsten die Wasserverdrängung zu gering ist, aber andererseits auch nicht zu groß sind, da sie sonst nicht in Messzylinder und Überlaufgefäß passen (größere Schrauben, Muttern und Ähnliches).*
- Wichtig ist auch, dass die verwendeten Körper nicht aus saugfähigem Material bestehen.*

Versuch 3 (SV)

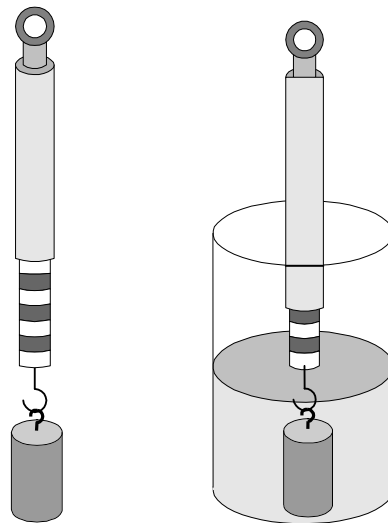
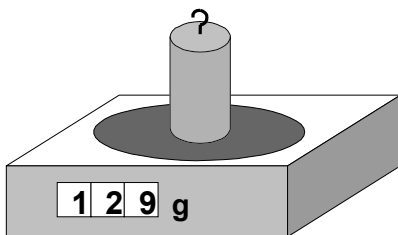
Aufbau

Kraftmesser, Waage, verschiedene Massestücke ($\rho > 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$), verschiedene Gegenstände ($\rho > 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$), eventuell die oben vorgeschlagenen Körper (Al, PVC) mit 50 mm Höhe, Becherglas, evtl. Zwirnsfaden, um die Körper am Kraftmesser zu befestigen

Durchführung

- Die Masse der verschiedenen Massestücke und Gegenstände wird mit Hilfe der Waage bestimmt.
- Das Gewicht der verschiedenen Massestücke und Gegenstände wird mit Hilfe des Kraftmessers bestimmt.
- Die Massestücke und Gegenstände werden in ein mit Wasser gefülltes Becherglas vollständig eingetaucht und es wird ihr Gewicht in Wasser bestimmt.
- Die Versuchsergebnisse werden in einer Tabelle notiert.

Körper bzw. Gegenstand	g	N	N in Wasser
1.			
2.			
3.			
4.			



Beobachtung

In Wasser verringert sich das Gewicht der Körper.

Erklärung

Wird ein Körper vollständig in Wasser getaucht, dann verringert sich seine Gewichtskraft. Die Verringerung der Gewichtskraft hängt vom Volumen der verdrängten Flüssigkeit ab, sie entspricht genau der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit. Dieses Phänomen bezeichnet man als archimedisches Prinzip oder Gesetz. Die Gewichtskraft, um die sich das Gewicht des eingetauchten Körpers verringert, heißt Auftrieb bzw. Auftriebskraft.

Versuch 4 (SV)

Aufbau

Wie Versuch 3; anstelle der bisherigen Körper sollen jetzt Körper mit möglichst großem Volumen ($\rho > 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) verwendet werden; eventuell größere Bechergläser verwenden

Durchführung

Wie Versuch 3.

Beobachtung

Wie Versuch 3.

Erklärung

Wie Versuch 3. Je größer das Volumen der Körper ist, desto größer ist auch die Verringerung des Gewichtes in Wasser bzw. die Auftriebskraft.

Hinweis: Vor dem nächsten Versuch sollte kurz über Volumeneinheiten (mm^3 , cm^3 , dm^3 usw.) und den Begriff der Dichte mit den Schülern gesprochen werden, insbesondere, dass Wasser die Dichte $1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ hat.

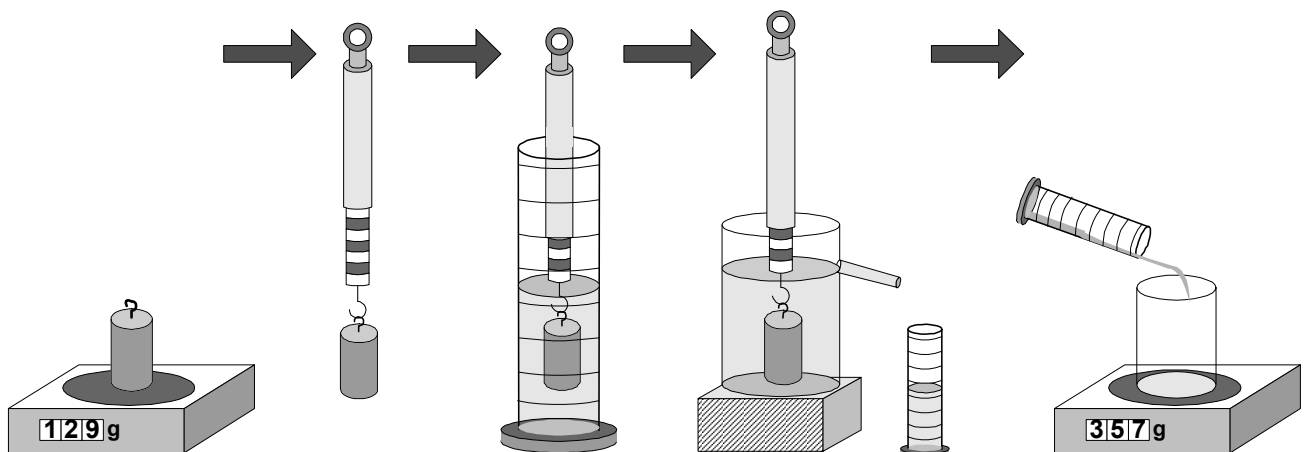
Versuch 5 (SV)

Aufbau

Verschiedene Körper ($\rho > 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$), Kraftmesser, Waage, Becherglas, Überlaufgefäß und/oder Messzylinder, Unterlegbrettchen

Durchführung

- Die Masse der Körper wird mit Hilfe der Waage bestimmt.
- Das Gewicht der Körper wird mit Hilfe des Kraftmessers bestimmt.
- Das Gewicht (und evtl. Volumen) der Körper in Wasser wird bestimmt.
- Die vom Körper verdrängte Wassermenge wird mit Hilfe eines Messzylinders bzw. eines Überlaufgefäßes bestimmt (ggf. Unterlegbrettchen verwenden).
- Die Masse des verdrängten Wassers wird in ein Becherglas geschüttet und mit der Waage bestimmt.



Beobachtung

Körper	g	N	N in Wasser	N Differenz	cm ³ verdrängtes Wasser	g verdrängtes Wasser	N verdrängtes Wasser
1							
2							
3							
4							

Erklärung

Das Gewicht der Körper verringert sich genau um das Gewicht des verdrängten Wassers. Dieses Prinzip wurde von dem griechischen Physiker und Mathematiker *Archimedes* vor über 2000 Jahren entdeckt und formuliert.

Versuch 6 (SV)

Aufbau

Kraftmesser, verschiedene Gegenstände aus Holz oder Kunststoff, deren Dichte ρ geringer ist als die von Wasser ($\rho < 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$), die also schwimmen, Kraftmesser, Waage, Becherglas, Überlaufgefäß und/oder Messzylinder

Durchführung

Wie Versuch 3.

Beobachtung

Die Körper schwimmen im Wasser und der Kraftmesser zeigt kein Gewicht an, d.h., das Gewicht der Körper in Wasser ist null.

Erklärung

Bei einem schwimmenden Körper sind Gewichtskraft und Auftriebskraft gleich. Das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit ist also genau so groß wie das Gewicht des schwimmenden Körpers. Dieser Fall tritt ein, wenn die Dichte ρ eines Körpers geringer ist als $1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, d.h. der Dichte von Wasser. Schwimmende Körper sinken also immer so weit in eine Flüssigkeit ein, bis Gewicht und Auftrieb gleich sind.

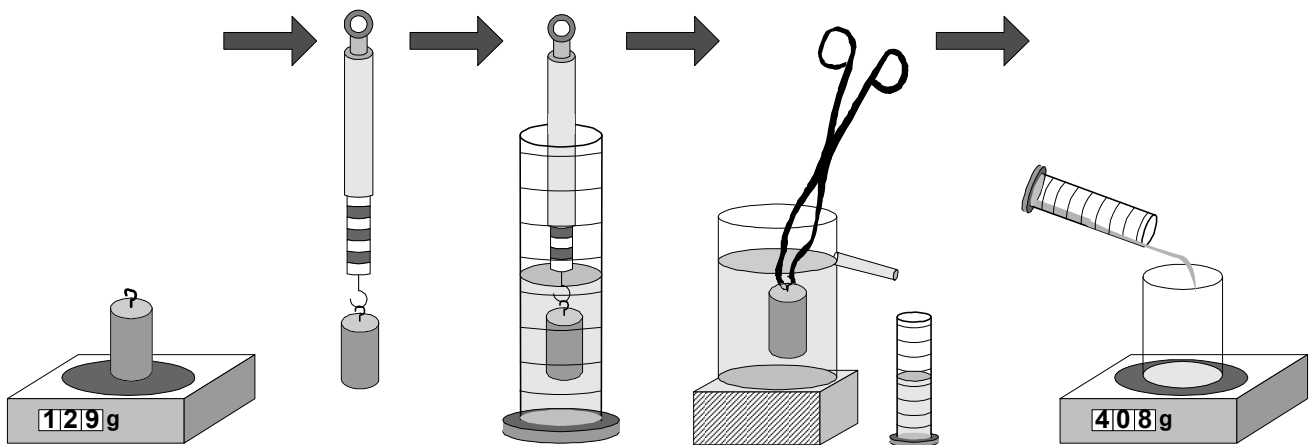
Versuch 7 (SV)

Aufbau

Kraftmesser, evtl. verschiedene Gegenstände aus Holz oder Kunststoff, deren Dichte ρ geringer ist als die von Wasser ($\rho < 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$), die also schwimmen, Kraftmesser, Waage, Becherglas, Überlaufgefäß und/oder Messzylinder, Tiegelzange, Unterlegbrettchen

Durchführung

Wie Versuch 3., wobei die Körper, da sie leichter als Wasser sind, zur Volumenbestimmung unter Wasser gedrückt werden müssen.



Beobachtung

Das verdrängte Wasser ist schwerer als die Masse des Körpers.

Erklärung

Ein Körper, der im Wasser schwimmt, hat eine Dichte, die geringer als die von Wasser ($\rho = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) ist. Das von ihm verdrängte Wasser muss daher eine größere Masse haben als seine eigene Masse. Die Differenz aus seiner Gewichtskraft und der des verdrängten Wassers ist die Auftriebskraft.

Versuch 8 (SV)

Aufbau

Kraftmesser, verschiedene Gegenstände, Becherglas, Salzlösung (in 100 g Wasser, d.h. in 100 cm³, lösen sich ca. 36 g Kochsalz, so dass die Lösung eine Dichte von $\rho \approx 1,2 - 1,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ hat)

Durchführung

Wie Versuch 3.

Beobachtung

In der Salzlösung ist das Gewicht der Körper geringer als in Wasser.

Erklärung

Eine gesättigte Salzlösung ($\rho \approx 1,2 - 1,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) hat eine größere Dichte als Wasser ($\rho = 1,0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$). Aus diesem Grund ist die Auftriebskraft auch größer als in Wasser, denn jeder verdrängte Kubikzentimeter wiegt nicht 1 g, sondern 1,2 g. Das bedeutet, dass der Auftrieb eines Körpers auch von der Dichte der verdrängten Flüssigkeit abhängt.

Hinweis: An dieser Stelle sollte auch auf den Begriff der Dichte mit dem Symbol ρ (rho) eingegangen werden, d.h. warum man einen Stoff (ein Material) als schwer und einen anderen als leicht bezeichnet. Den Schülern kann das mit Hilfe eines Dichtewürfelsatzes verdeutlicht werden, so dass sie erkennen, dass

- die Dichte eines Stoffes immer von Masse und Volumen abhängt
- die Einheit der Dichte ist g/cm³ oder kg/dm³ oder t/m³ (die korrekte Einheit der Dichte im SI-System wird in kg/m³ angegeben)

Die Schüler erhalten eine Tabelle mit den Dichten der wichtigsten Stoffe (vgl. Anhang).

Hinweis: Die Versuche 5, 6, 7 und 8 können auch in Lernstationen durchgeführt werden.

BEISPIELE AUS NATUR, ALLTAG UND TECHNIK

- a) Freibordmarken an der Bordwand von Schiffen; hier wird angezeigt, wie stark Schiffe in verschiedenen Wasserarten – Salzwasser, Süßwasser, warmes Wasser , kaltes Wasser – beladen werden dürfen.
- b) Schwimmen in Salzwasser.
- c) Spezialfall: Schwimmen im Toten Meer.
- d) Heben gesunkener Schiffe mit Hilfe von Luft bzw. Styroporkügelchen
- e) Das Prinzip, nach dem U-Boote über und unter Wasser fahren.
- f) Fische regulieren ihre Tauchtiefe mit Hilfe einer Schwimmblase.
- g) Bestimmung der Frostschutzmittelkonzentration im Kühlsystem eines Autos mit Hilfe einer Senkwaage (Aräometer); mit ihrer Hilfe kann die Dichte der Kühlflüssigkeit bestimmt werden (Ethylenglykol $\rho = 1,1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, Wasser $\rho = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$). Vgl. auch Öchslewaage.

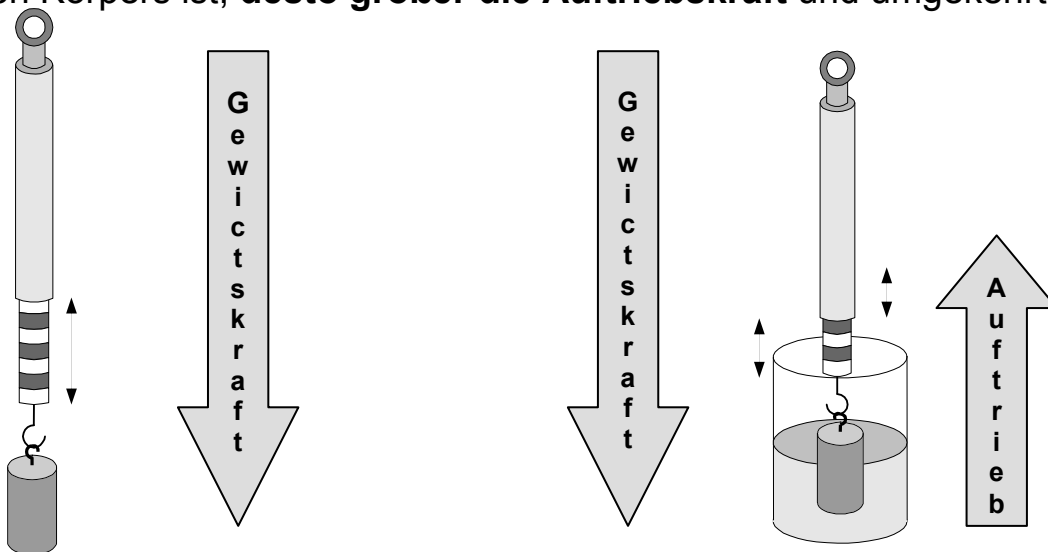
1. Auftrieb in Flüssigkeiten

Wenn ein Körper in eine Flüssigkeit **eintaucht**, dann **wird sein Gewicht kleiner**; er erleidet also einen **Gewichtsverlust**.

Dieser Gewichtsverlust hängt vom Volumen (Rauminhalt) der verdrängten Flüssigkeit ab.

Man bezeichnet die **Kraft**, die den eingetauchten Körper **nach oben** treibt, als **Auftrieb bzw. Auftriebskraft**.

Je größer das Volumen der verdrängten Flüssigkeitsmenge eines eingetauchten Körpers ist, **desto größer die Auftriebskraft** und umgekehrt.



Dieses Prinzip wurde vor mehr als 2000 Jahren von dem griechischen Physiker und Mathematiker **Archimedes** entdeckt und heißt deswegen auch das **archimedische Prinzip**.

Unter der **Dichte** eines Stoffes versteht man, wie viel Gramm (g) ein Kubikzentimeterwürfel (cm³) wiegt.

Beispiel: Wasser hat eine Dichte von $1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Aluminium hat eine Dichte von $2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$



Der Auftrieb eines Körpers hängt ab

- vom Volumen der **verdrängten Flüssigkeit**
- von der **Dichte der verdrängten Flüssigkeit**
(je größer ihre Dichte, desto größer der Auftrieb und umgekehrt)

Zeichne und beschreibe, wie wir herausgefunden haben, dass Körper im Wasser leichter werden und nicht mehr so viel wiegen wie außerhalb des Wassers.

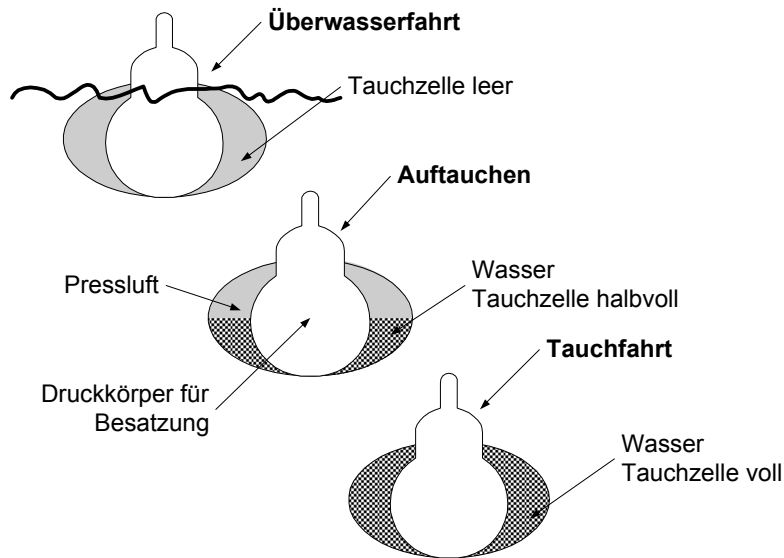
Rechne um.

N	g
7	
5	
6,3	
0,7	
28	
0,04	
129	
14,5	
487	
0,79	

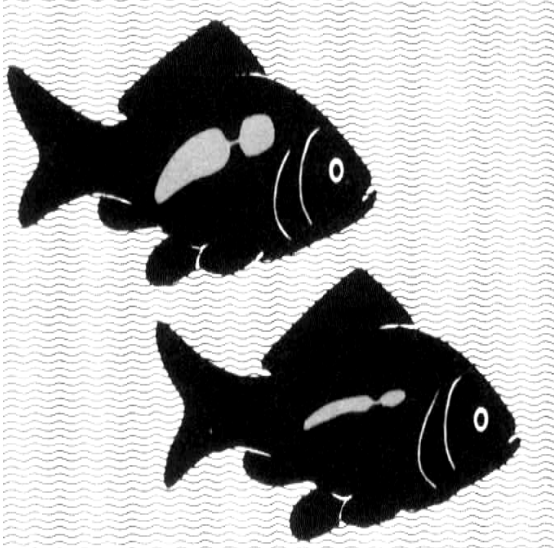
g	N
600	
200	
45	
5000	
236	
8	
4589	
90	
375	
12	

Bei einem Kraftmesser gilt: Je schwerer der Körper, der an ihm hängt, desto stärker wird
Je leichter der Körper, der an ihm hängt, desto geringer wird
Auftrieb entsteht, wenn ein Körper Wasser oder eine andere
Ein Eisenwürfel und ein gleich großer Holzwürfel werden in Wasser getaucht. Ist die Auftriebskraft bei beiden gleich oder unterschiedlich?
Was bedeutet es, wenn man sagt, dass Wasser eine Dichte von $\rho = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ hat?
Was bedeutet es, wenn man sagt, dass Gold eine Dichte von $\rho = 19,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ hat?
Warum kann man sagen, dass Kupfer schwerer ist als Aluminium?
Warum ist es kaum möglich, einen großen Kunststoffball unter Wasser zu drücken?
Warum geht man im Wasser nicht unter, wenn man tief Luft geholt hat?
Wie kommt es, dass ein Schiff aus Stahl ($\rho = 7,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) schwimmt und nicht untergeht?

Beschreibe und erkläre, wie U-Boote sinken und steigen mit Hilfe der folgenden Zeichnung.



Erkläre, wie diese Fische mit Hilfe der Schwimmblase ihre Tauchtiefe regulieren.



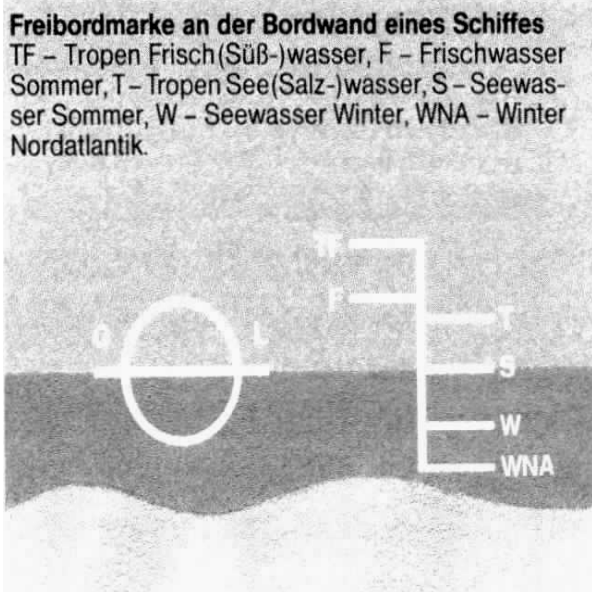
Um ein gesunkenes Schiff zu heben, wurden Styroporkugeln in seinen Rumpf gepumpt. Erkläre, warum das Schiff anschließend aufstieg und an der Wasseroberfläche auftauchte.

Begründe, warum gerade im Toten Meer kein Schwimmer ertrinken kann.



Was würde geschehen, wenn man in einem Quecksilbersee ($\rho = 13,6 \text{ g/cm}^3$) schwimmen würde?

Schiffe besitzen Markierungen, an denen man ablesen kann, wie hoch sie in Salzwasser und in Süßwasser beladen werden dürfen. Warum hat man das gemacht?



Erkläre, warum ein Körper aus Styropor sich kaum unter Wasser drücken lässt, während das bei einem gleich großen Körper aus Holz relativ einfach geht.

Lösungen zu Arbeitsblatt 1.2

Zeichne und beschreibe, wie wir herausgefunden haben, dass Körper im Wasser leichter werden und nicht mehr so viel wiegen wie außerhalb des Wassers.

Vgl. die Versuche 3, 4, 5

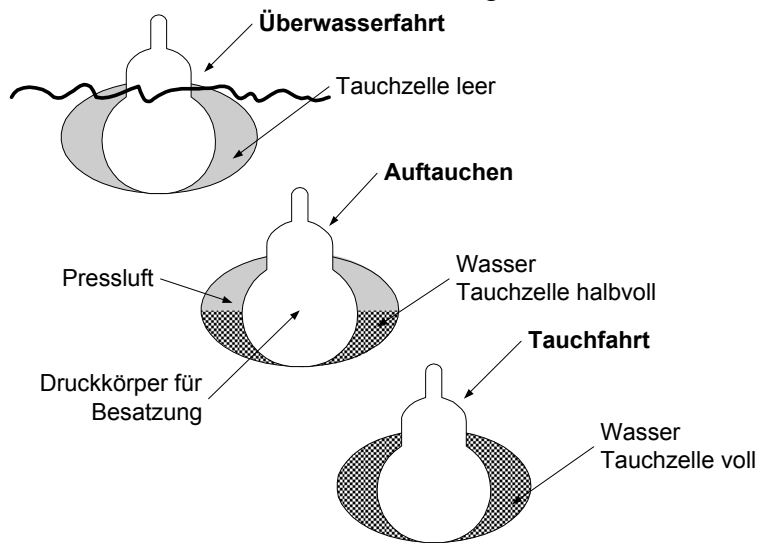
Rechne um.

N	g
7	700
5	500
6,3	630
0,7	70
28	2800
0,04	4
129	12900
14,5	1450
487	48700
0,79	79

g	N
600	6
200	2
45	0,45
5000	50
236	2,36
8	0,08
4589	45,89
90	0,9
375	3,75
12	0,12

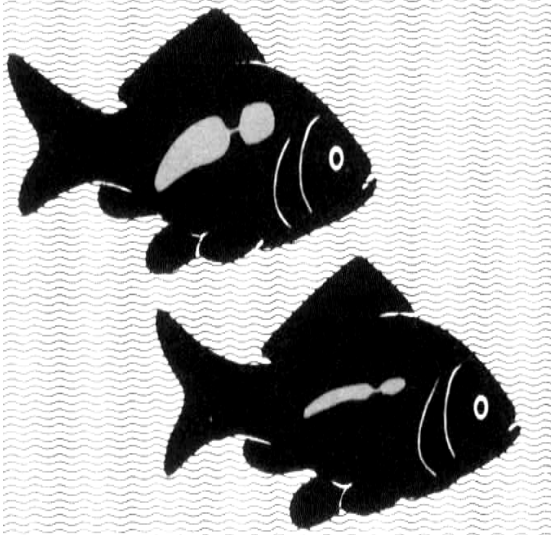
Bei einem Kraftmesser gilt: Je schwerer der Körper, der an ihm hängt, desto stärker wird <i>die Feder gedehnt und die Skala herausgezogen.</i>
Je leichter der Körper, der an ihm hängt, desto geringer wird <i>die Feder gedehnt und die Skala herausgezogen.</i>
Auftrieb entsteht, wenn ein Körper <i>in Wasser (oder in eine andere Flüssigkeit) eintaucht.</i>
Ein Eisenwürfel und ein gleich großer Holzwürfel werden in Wasser getaucht. Ist die Auftriebskraft bei beiden gleich oder unterschiedlich? <i>Sie ist gleich, da sie nur von der verdrängten Wassermenge, die bei beiden Körpern gleich ist, abhängt.</i>
Was bedeutet es, wenn man sagt, dass Wasser eine Dichte von $\rho = 1$ hat? <i>Das bedeutet, dass 1 cm³ Wasser 1 g wiegt (1 dm³ 1 kg wiegt, 1 m³ 1 t wiegt).</i>
Was bedeutet es, wenn man sagt, dass Gold eine Dichte von $\rho = 19,3$ hat? <i>Das bedeutet, dass 1 cm³ Gold 19,3 g wiegt (1 dm³ 19,3 kg wiegt, 1 m³ 19,3 t wiegt).</i>
Warum kann man sagen, dass Kupfer schwerer ist als Aluminium? <i>Die Dichte von Kupfer beträgt 7,8 g, während die von Aluminium 2,6 g beträgt.</i>
Warum ist es kaum möglich, einen großen Kunststoffball unter Wasser zu drücken? <i>Die dabei entstehende Auftriebskraft ist sehr groß, weil der Ball sehr viel Wasser verdrängt, wenn er untergetaucht ist. Hinzukommt, dass der Ball, da er sehr leicht ist, von sich aus kaum im Wasser schwimmt.</i>
Warum geht man im Wasser nicht unter, wenn man tief Luft geholt hat? <i>Durch das Luftholen nimmt die räumliche Ausdehnung unseres Körpers zu, d.h., sein Volumen vergrößert sich. Dadurch wird die von ihm verdrängte Wassermenge größer, wodurch sich seine Auftriebskraft erhöht; man kann auch sagen, dass sich die Dichte des Menschen dadurch verringert.</i>
Wie kommt es, dass ein Schiff aus Stahl ($\rho = 7,8 \text{ g/cm}^3$) schwimmt und nicht untergeht? <i>Die schwere Stahlhülle, die mit Luft, deren Dichte vernachlässigt werden kann, gefüllt ist, verdrängt so viel Wasser, dass trotzdem eine große Auftriebskraft entsteht und das Schiff schwimmen lässt. Die Mischdichte des Körpers aus Stahl und Luft ist deutlich kleiner als 1.</i>

Beschreibe und erkläre, wie U-Boote sinken und steigen mit Hilfe der folgenden Zeichnung.



Bei der Überwasserfahrt verdrängt das U-Boot so viel Wasser, dass die Auftriebskraft ausreicht, es oberhalb der Wasseroberfläche schwimmen zu lassen, d.h., die Auftriebskraft ist größer als das Gewicht des U-Booters. Soll das U-Boot sinken, so muss in die Tauchzelle Wasser eingelassen werden, damit sein Gewicht steigt. Die Auftriebskraft reicht jetzt nicht mehr aus, um das U-Boot auf der Wasseroberfläche schwimmen zu lassen. Beim Auftauchen muss Wasser aus den Tauchzellen herausgedrückt werden, damit das Gewicht verringert wird und die Auftriebskraft ausreicht, um das Boot an der Oberfläche schwimmen zu lassen.

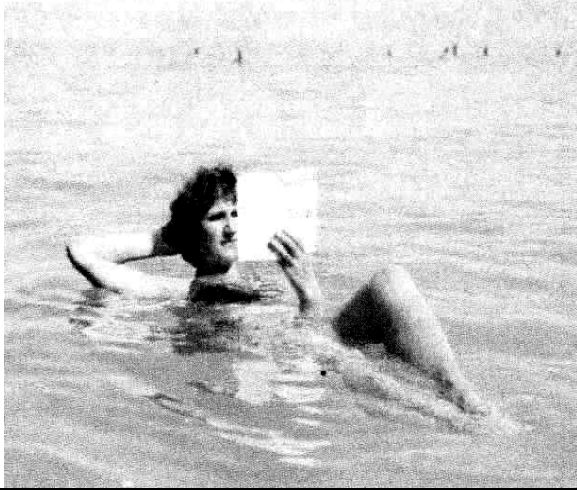
Erkläre, wie diese Fische mit Hilfe der Schwimmblase ihre Tauchtiefe regulieren.



Wenn die Schwimmblase mit Luft gefüllt wird, dann nimmt das Volumen des Fisches zu. Dieses größere Volumen bewirkt, dass mehr Wasser verdrängt wird und damit auch die Auftriebskraft vergrößert wird. Auf diese Weise steuern Fische ihre Tauchtiefe.

Um ein gesunkenes Schiff zu heben, wurden Styroporkugeln in seinen Rumpf gepumpt. Erkläre, warum das Schiff anschließend aufstieg und an der Wasseroberfläche auftauchte. Wenn Styroporkugeln, die eine äußerst geringe Dichte besitzen, das Wasser aus dem Schiffsrumpf verdrängen, dann reicht die dadurch entstehende Auftriebskraft aus, den Schiffsrumpf nach oben steigen zu lassen.

Begründe, warum gerade im Toten Meer kein Schwimmer ertrinken kann.



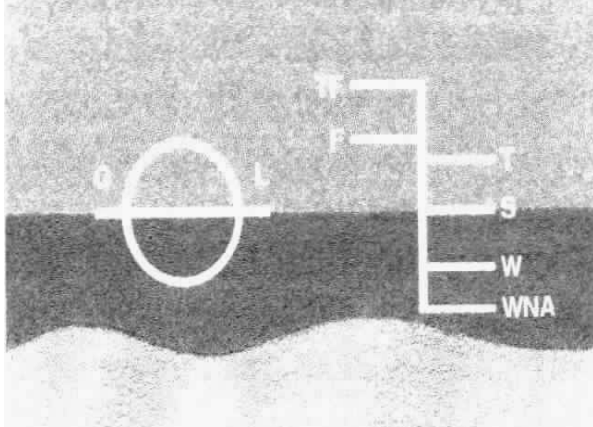
Da Salzwasser im Toten Meer schwerer ist als normales Salzwasser, erzeugt es auch eine größere Auftriebskraft bei einem Schwimmer. Diese größere Auftriebskraft bewirkt, dass im Toten Meer niemand untergehen kann.

Was würde geschehen, wenn man in einem Quecksilbersee ($\rho = 13,6 \text{ g/cm}^3$) schwimmen würde?

Da Quecksilber eine sehr große Dichte hat, erzeugen schon ca. 4 - 6 Liter (entsprechend 54,4 - 81,6 kg), die verdrängt werden, eine so starke Auftriebskraft, dass ein Mensch nur ganz geringfügig in diesen Quecksilbersee einsinken würde.

Schiffe besitzen Markierungen, an denen man ablesen kann, wie hoch sie in Salzwasser und in Süßwasser beladen werden dürfen. Warum hat man das gemacht?

Freibordmarke an der Bordwand eines Schiffes
 TF – Tropen Frisch(Süß-)wasser, F – Frischwasser
 Sommer, T – Tropen See(Salz-)wasser, S – Seewasser
 Sommer, W – Seewasser Winter, WNA – Winter
 Nordatlantik.



Süßwasser hat eine geringere Dichte als Salzwasser, ist also leichter. Wenn ein Schiff nun mit einer bestimmten Ladung in Salzwasser beladen wird, sinkt es bis zu einer bestimmten Marke ein. Gerät dieses Schiff nun in Süßwasser, dann muss mehr Wasser verdrängt werden, um die gleiche Auftriebskraft wie in Salzwasser zu erreichen. Das Schiff muss daher tiefer einsinken und mehr Wasser verdrängen.

Erkläre, warum ein Körper aus Styropor sich kaum unter Wasser drücken lässt, während das bei einem Körper aus Holz relativ einfach geht.

Beide Körper, der aus Holz und der aus Styropor, verdrängen, wenn sie gleich groß sind, die gleiche Menge Wasser. Da aber Styropor eine 30- bis 50mal geringere Dichte als Holz hat, der Körper also eine dementsprechend geringere Gewichtskraft besitzt, verstärkt sich die Auftriebskraft entsprechend um diesen Faktor.

2. Lufthülle der Erde

Hinweis: In diesem Abschnitt soll den Schülern klargemacht werden, dass

- *unsere Lufthülle sich wie ein mit Wasser gefülltes Gefäß verhält und auf alle Körper einen Schweredruck ausübt*
- *wir auf dem Grund eines Luftmeeres leben*
- *in dieser Lufthülle – genau wie im Wasser – Auftriebskräfte wirken*

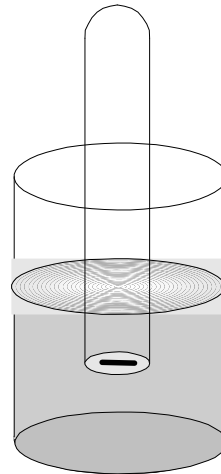
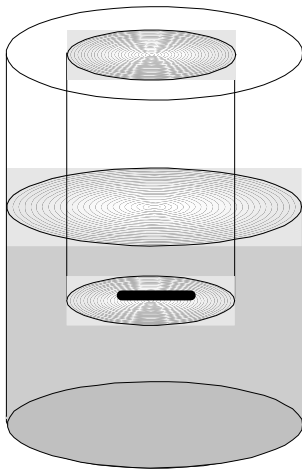
Versuch 1 (SV)

Aufbau

Reagenzglas oder kleines Becherglas, großes Becherglas (alternativ Standzylinder, Glaswanne), kleines Hölzchen

Durchführung

Das Becherglas (Reagenzglas) wird mit der Öffnung in ein mit Wasser gefülltes Becherglas getaucht. Bevor das Reagenzglas (Becherglas) in das Wasser getaucht wird, wird ein kleines Hölzchen auf die Wasseroberfläche gelegt.



Beobachtung

Es gelangt keine Luft in das Becherglas (Reagenzglas). Das sieht man daran, dass das Hölzchen ganz unten schwimmt.

Erklärung

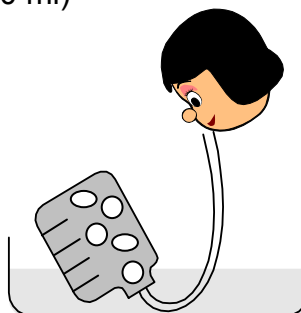
Die im Becherglas (Reagenzglas) befindliche Luft ist ein Stoff und verhindert deshalb, dass Wasser in das Gefäß eindringen kann.

Versuch 2 (SV)

Aufbau

Große Kunststoffwanne (ca. 20 l), 5 l-Kunststoffkanister mit Verschluss (leerer Frostschutzmittelkanister oder ähnliches; gut reinigen), ca. 70 cm Gummischlauch mit etwas größerem Durchmesser, großes Becherglas (700-1000 ml)

Durchführung



Der Kanister wird mit einer Liter-Skala, die mit einem wasserfesten Filzstift aufgezeichnet wird, versehen. Anschließend wird er bis zur Öffnung mit Wasser gefüllt, so dass er keine Luft mehr enthält und dann verschlossen. Dann wird er, mit der Öffnung nach unten, in die mit Wasser gefüllte Wanne gestellt und der Verschluss wird abgeschraubt. Jetzt wird der Schlauch in die unter Wasser befindliche Öffnung eingeführt und es kann Luft in den Kanister gepustet werden. Danach kann man an der Skala grob ablesen, wie groß das Lungenvolumen des Schülers ist, der gepustet hat. Für einen neuen Versuch mit einem anderen Schüler wird der Kanister mit dem Becherglas wieder aufgefüllt und das Schlauchende wird desinfiziert.

Beobachtung

Die Luft verdrängt das Wasser aus dem Kanister und man kann messen, welches Lungenvolumen die Person hat, die Luft in den Kanister bläst.

Erklärung

Da Luft ein Stoff ist, verdrängt sie das im Kanister befindliche Wasser.

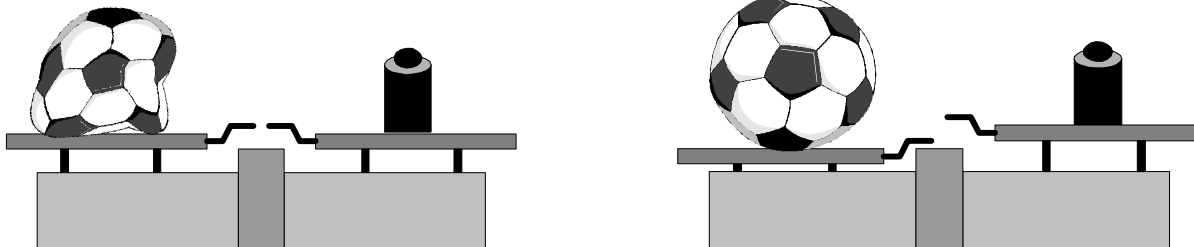
Versuch 3 (LV)

Aufbau

Fußball (wenn vorhanden, 2 gleiche Bälle verwenden), Ballpumpe, Tafelwaage (evtl. Digitalwaage / 0,1g), Gewichtssatz

Durchführung

Der unaufgepumpte und der aufgepumpte Ball werden auf einer Tafelwaage gewogen.



Beobachtung

Der prall aufgepumpte Ball ist schwerer.

Erklärung

Da Luft ein Stoff ist und somit ein Gewicht hat, muss der aufgepumpte Ball schwerer sein, da sich in ihm eine größere Luftmenge befindet als in dem „schlappen“ Ball.

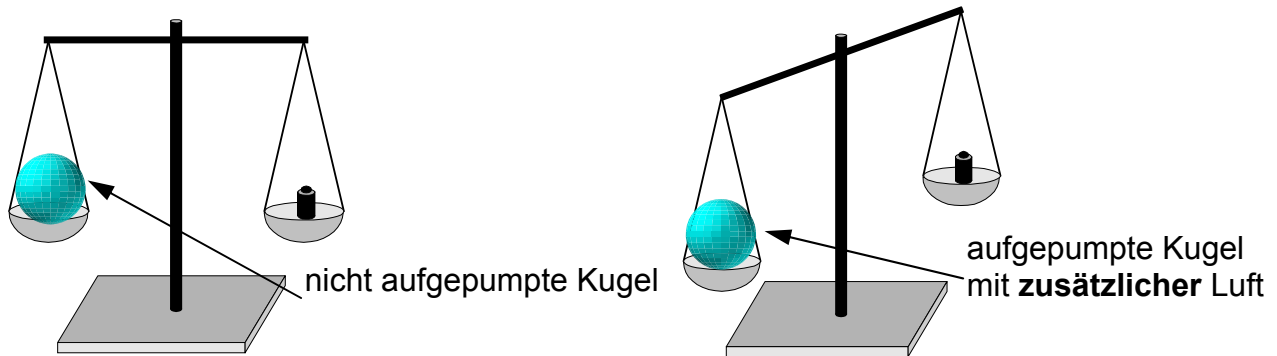
Versuch 4 (LV)

Aufbau

Balkenwaage, Gewichtssatz, Kunststoffkugeln mit Ventil, Luftpumpen

Durchführung

Es wird eine unaufgepumpte Kunststoffkugel auf eine Waagschale der Balkenwaage gelegt. Diese wird anschließend ins Gleichgewicht gebracht (zur genauen Austarierung Sand oder Papierschnipsel verwenden). Jede Schülergruppe pumpt dann ihre Kugel so stark wie möglich auf und legt sie zum Vergleich auf die Waagschale.



Beobachtung

Die aufgepumpte Kugel ist schwerer als die nicht aufgepumpte Kugel.

Erklärung

Da Luft ein Stoff ist und somit ein Gewicht hat, muss die aufgepumpte Kugel schwerer sein, da sich in ihr eine größere Luftmenge befindet als in der anderen Kugel.

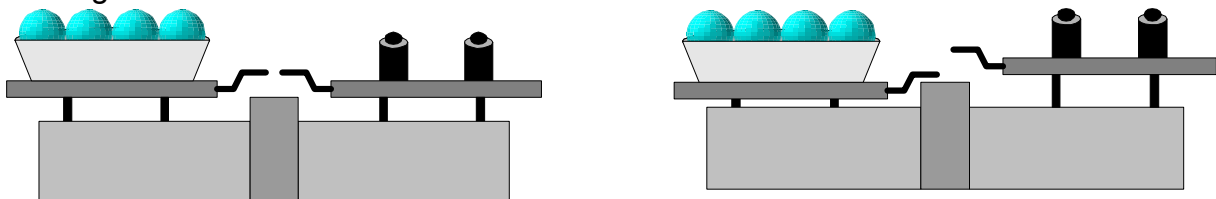
Versuch 5 (LV)

Aufbau

Tafelwaage, mehrere Kunststoffkugeln mit Ventil, Pumpen, Kunststoffschale, in die mehrere Kugeln hineinpassen, 2 Bechergläser, Gewichte oder Sand

Durchführung

- Die Kugeln werden unaufgepumpt in die Kunststoffschale gelegt. Diese wird auf eine Seite der Tafelwaage gestellt. Anschließend wird die Tafelwaage mit Hilfe von Gewichten oder mit einem sandgefüllten Becherglas (ist sehr einfach und sehr genau) ins Gleichgewicht gebracht.
- Die Schüler nehmen die Kugeln aus der Schale und pumpen sie so stark wie möglich auf und legen sie dann wieder in die Schale zurück.



Beobachtung

Die Waage neigt sich deutlich auf die Seite der mit Luft gefüllten Kugeln.

Erklärung

Da Luft ein Gewicht hat, müssen die aufgepumpten Kugeln schwerer sein als die nicht aufgepumpten, denn es befindet sich mehr Luft in den aufgepumpten Kugeln.

Versuch 6 (LV)

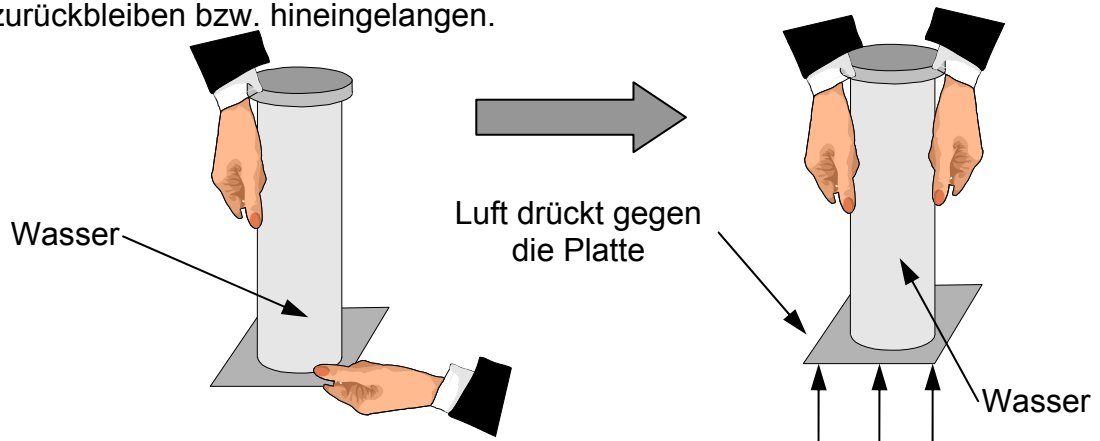
Aufbau

1 Standzylinder, Postkarte (stabil), eine glatte Kunststoffplatte oder etwas Ähnliches

Durchführung

Der Standzylinder wird randvoll mit Wasser gefüllt und mit der Postkarte (Kunststoffplatte oder etwas Ähnliches) verschlossen. Anschließend wird der Standzylinder um 180° gedreht, so dass die Öffnung nach unten zeigt.

Achtung: Es darf nach dem Verschließen des Standzylinders keinerlei Luft über der Wasseroberfläche zurückbleiben bzw. hineingelangen.



Beobachtung

Das Wasser bleibt im Standzylinder und stürzt nicht heraus.

Erklärung

Da Luft ein Stoff ist und ein Gewicht hat, übt sie einen Druck aus (Luftdruck). Der äußere Luftdruck bewirkt, dass das Wasser nicht aus dem Gefäß herausläuft. Hinzu kommt die Adhäsion zwischen der glatten Oberfläche der Abdeckplatte und dem glatten Glas des Standzylinders.

Versuch 7 (LV)

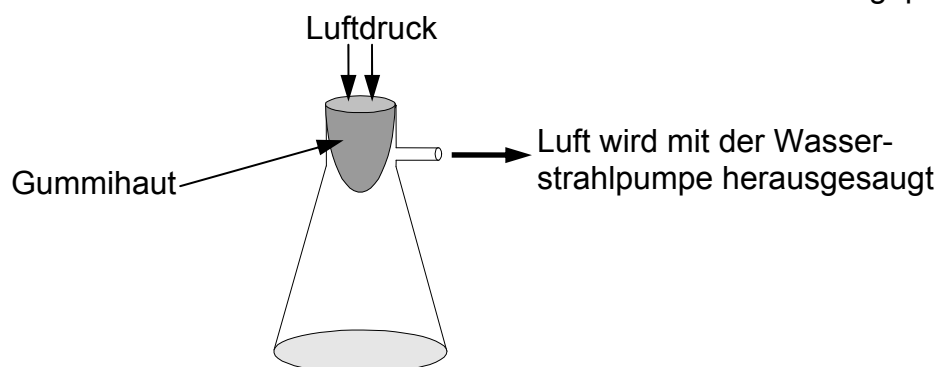
Aufbau

1 Erlenmeyerkolben mit seitlichem Ansatz, 1 Luftballon, Wasserstrahlpumpe (falls vorhanden, kann auch eine elektrische Pumpe verwendet werden), Unterdruckschlauch

Durchführung

Über die Öffnung des Erlenmeyerkolbens wird eine Gummihaut gespannt (Luftballon an der Seite aufschneiden). Danach wird der Kolben mit Hilfe einer Wasserstrahlpumpe luftleer gepumpt (evakuiert).

Achtung: Zum Evakuieren keinen normalen Gummischlauch, sondern einen dickwandigen Unterdruckschlauch verwenden. Der normale Gummischlauch würde zusammengepresst werden.



Beobachtung

Die Gummihaut wird in den Erlenmeyerkolben hineingedrückt („gezogen“) und kann bei entsprechend hohem Unterdruck im Kolben mit einem Knall zerreißen.

Erklärung

Im Erlenmeyerkolben entsteht ein starker Unterdruck (ein schwaches Vakuum), so dass die Kraftwirkung des äußeren Luftdrucks (10 N/cm^2) bewirkt, dass die Gummihaut in den Kolben hineingedrückt und sogar zerrissen wird.

Versuch 8 (LV)

Aufbau

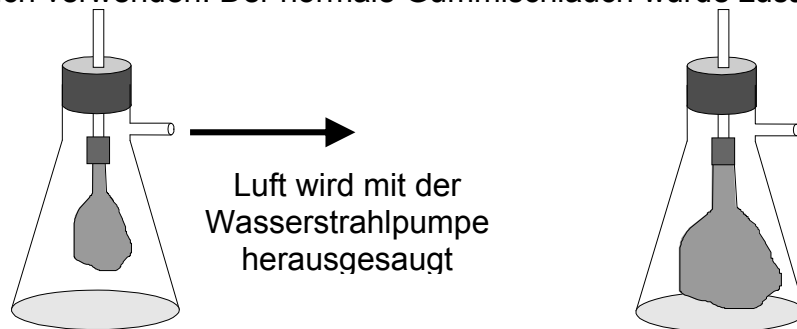
Erlenmeyerkolben mit seitlichem Ansatz, Glasrohr, kleiner durchbohrter Gummistopfen, großer durchbohrter Gummistopfen, Luftballon, Wasserstrahlpumpe, Schlauch

Durchführung

Der Erlenmeyerkolben wird mit einem durchbohrten Gummistopfen, in dem ein Glasrohr steckt, verschlossen. Das Ende des Glasrohres, das in den Kolben hineinragt, steckt in einem kleinen durchbohrten Stopfen, über den ein Luftballon gezogen wurde.

Danach wird der Kolben mit Hilfe einer Wasserstrahlpumpe luftleer gepumpt (evakuiert).

Achtung: Zum Evakuieren keinen normalen Gummischlauch, sondern einen dickwandigen Unterdruckschlauch verwenden. Der normale Gummischlauch würde zusammengepresst werden.



Beobachtung

Der Luftballon wird wie von selbst prall aufgepumpt.

Erklärung

Im Erlenmeyerkolben entsteht ein starker Unterdruck (ein schwaches Vakuum), so dass der Luftballon durch den äußeren Luftdruck aufgepumpt wird.

Versuch 9 (LV)

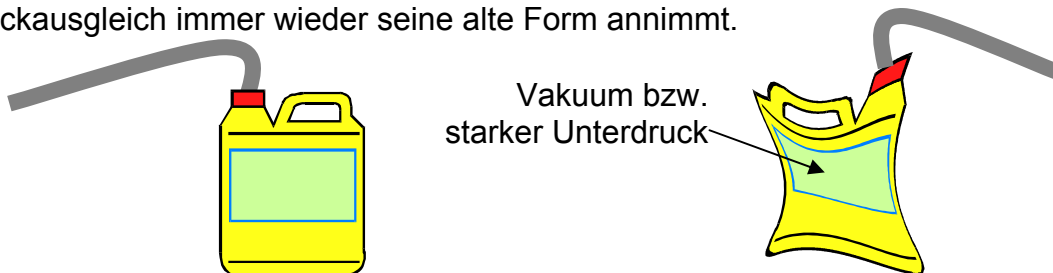
Aufbau

1 Kunststoffkanister, 1 durchbohrter Gummistopfen, 1 kurzes Glasrohr, 1 Wasserstrahlpumpe

Durchführung

Ein leerer Kunststoffkanister (5 l oder 10 l) wird mit einem durchbohrten Gummistopfen, in dem ein kurzes Glasrohr steckt, verschlossen. Das Glasrohr wird an einen Unterdruckschlauch angeschlossen, der mit einer Wasserstrahlpumpe verbunden ist. Anschließend wird der Kanister evakuiert.

Achtung: Der Versuch lässt sich auch mit einem Blechkanister durchführen. Dabei ist aber zu beachten, dass der Blechkanister nur einmal verwendet werden kann, da er stark verbeult. Ein Kunststoffkanister kann mehrfach verwendet werden, da er elastisch ist und bei einem Druckausgleich immer wieder seine alte Form annimmt.



Beobachtung

Der Kanister wird immer stärker zusammengedrückt, je länger er an der Wasserstrahlpumpe angeschlossen ist. Entfernt man den Gummistopfen, nimmt der Kanister wieder seine alte Form an.

Erklärung

Im Kanister wird ein starker Unterdruck erzeugt, so dass der äußere Luftdruck ihn aufgrund seines elastischen Materials zusammendrücken kann. Bei einem Druckausgleich kann er dann wieder seine alte Form annehmen.

Versuch 10 (SV)

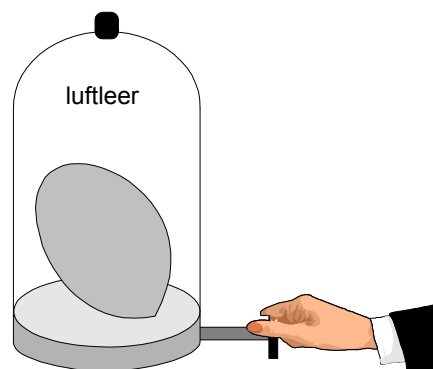
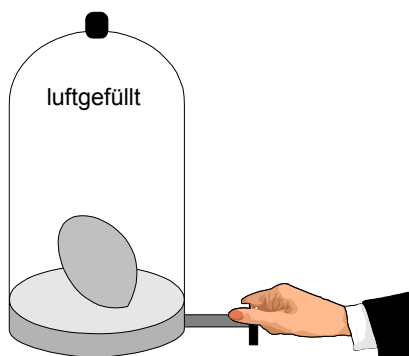
Aufbau

Kunststoffrezipient mit Pumpe, Luftballon

Durchführung

Ein nicht allzu stark aufgeblasener Luftballon wird unter einen Rezipienten gelegt, der anschließend evakuiert wird.

Achtung: Dieser Versuch kann - falls vorhanden - noch wesentlich eindrucksvoller mit einer elektr. Vakuumpumpe als ergänzender Lehrerversuch durchgeführt werden.



Beobachtung

Der Ballon wird immer größer, je stärker der Unterdruck im Rezipienten wird. Bei sehr starkem Unterdruck kann er sogar platzen. Lässt man wieder Luft hineinströmen, nimmt der Luftballon wieder seine normale Größe an.

Erklärung

Da im Rezipienten ein starker Unterdruck herrscht und somit der äußere Luftdruck nicht mehr auf den Ballon einwirkt, kann die Luft im Ballon ihr Volumen vergrößern.

Hinweis: Versuch 10 kann auch mit einem Negerkuss (Schaumkuss) durchgeführt werden. Bei zunehmender Evakuierung nimmt das Volumen des Schaumkusses immer mehr zu. Strömt Luft in den Rezipienten, dann nimmt sein Volumen wieder ab. Dies liegt daran, dass der Schaum im Inneren Luftblässchen enthält, deren Luftvolumen zunimmt, wenn der äußere Luftdruck geringer wird.

Versuch 11 (LV/SV)

Aufbau

1 Paar Magdeburger Halbkugeln, Wasserstrahlpumpe, (evtl. auch Handvakuumpumpe oder elektr. Vakuumpumpe)

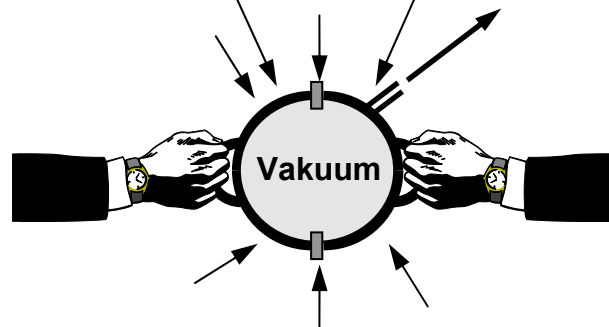
Durchführung

Die Magdeburger Halbkugeln werden mit Hilfe einer Wasserstrahlpumpe evakuiert. Verschiedene Schülerpaare versuchen anschließend die beiden Kugelhälften auseinander zu ziehen.

Achtung: Evtl. die Kugelränder vor dem Evakuieren etwas einfetten.

Die äußere Luft drückt gegen die beiden Halbkugeln

Ventil, durch das die Luft mit einer Pumpe herausgesaugt wird



Beobachtung

Die Halbkugeln lassen sich normalerweise von den Schülern nicht auseinander ziehen.

Erklärung

Da in den Halbkugeln ein Vakuum herrscht, werden sie durch die Kraft des äußeren Luftdrucks so stark zusammengepresst, dass man sie nicht auseinander ziehen kann (die Kraft, mit der der äußere Luftdruck gegen die Kugelhälften drückt, beträgt ca. 3000 N bzw. physikalisch nicht korrekt ca. 300 kg).

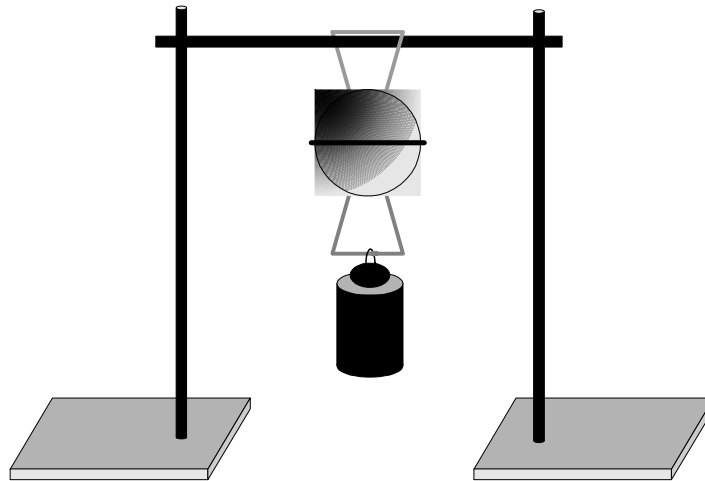
Versuch 12 (LV)

Aufbau

1 Paar Magdeburger Halbkugeln, Wasserstrahlpumpe, (evtl. auch Handvakuumpumpe oder elektr. Vakuumpumpe), 2 Stative, 2 Doppelmuffen, 1 lange Stativstange, 1 großes Gewicht bzw. mehrere große Gewichte (5 kg oder mehr), etwas kräftige Schnur

Durchführung

- a) Die Magdeburger Halbkugeln werden mit Hilfe einer Wasserstrahlpumpe evakuiert. Achtung: Evtl. die Kugelränder vor dem Evakuieren etwas einfetten.
- b) Durch den Griff der Magdeburger Halbkugeln wird die lange Stativstange geschoben.
- c) Die lange Stativstange wird mit Hilfe der Doppelmuffen waagrecht an zwei Stativen sorgfältig befestigt. Bei der Konstruktion ist auf Standfestigkeit zu achten.
- d) Am nach unten hängenden Griff der Magdeburger Halbkugeln wird ein möglichst schweres Gewichtsstück mit Hilfe einer Schlinge befestigt (evtl. auch mehrere Gewichtsstücke befestigen). Bei der Konstruktion ist auf Standfestigkeit zu achten.



Beobachtung

Die Halbkugeln werden auch durch ein oder mehrere große Gewichte, die angehängt werden, nicht auseinandergezogen.

Erklärung

Vgl. Versuch 10.

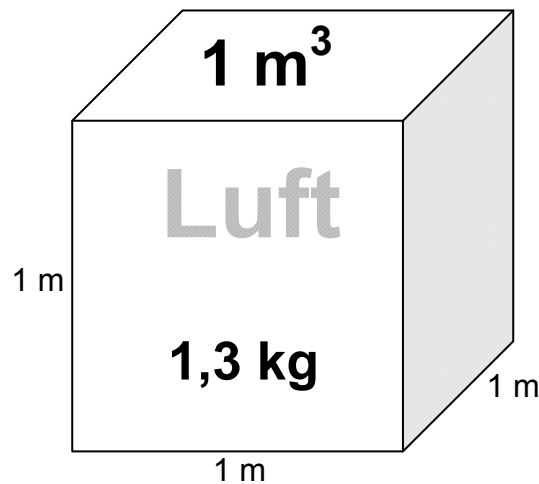
BEISPIELE AUS NATUR, ALLTAG UND TECHNIK

- a) Saughaken
- b) Trinken mit einem Trinkhalm
- c) Saugglocke zum Reinigen von Abflüssen
- d) Luftwiderstand bei hoher Geschwindigkeit
- e) Schäden durch Orkane

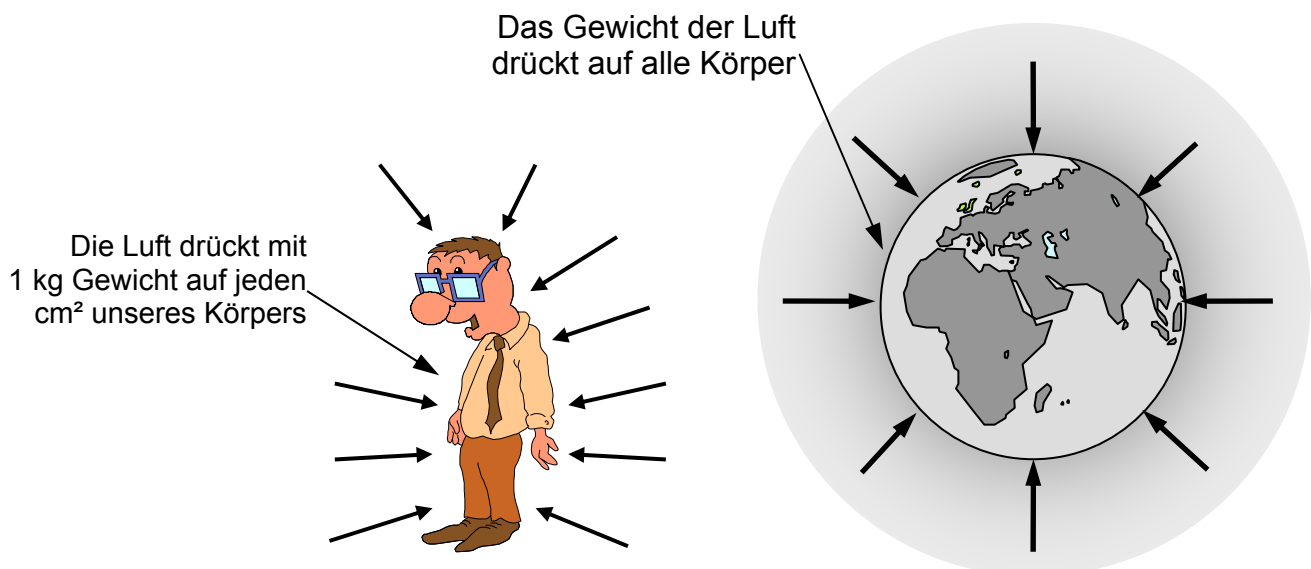
2. Lufthülle der Erde

Die Erde ist von einer **Lufthülle** bzw. **Atmosphäre** umgeben. Wir leben auf dem Grund dieses „**Luftmeeres**“, das eine Höhe von ca. **400 km** hat. Da Luft ein **Stoff** ist und ein **Gewicht** besitzt, übt die Lufthülle auf alle Körper einen **Druck (Luftdruck)** aus, d.h. sie drückt mit ihrem Gewicht auf jeden Körper.

1 Kubikmeter (m^3) Luft, das ist ein Würfel mit 1 m Kantenlänge, wiegt **1,3 kg**.



Dieser Druck ist um so größer, je tiefer man in die Lufthülle eintaucht. Er ist daher auf der **Erdoberfläche am größten** und **nimmt mit zunehmender Höhe ab**.



Ist in einem Gefäß ein **Vakuum** (luftleerer Raum) bzw. ein **starker Unterdruck** vorhanden, dann **drückt** die **äußere Luft mit großer Kraft** gegen die Wände des Gefäßes, weil innen **keine bzw. nur sehr wenig Luft** ist, die dagegen drückt

Nenne Beispiele, an denen man erkennt, dass Luft ein Stoff ist.

Beschreibe einen Versuch, wo wir gezeigt haben, dass Luft ein Stoff ist, der Raum benötigt.
Vgl. Versuch 1

Beschreibe einen Versuch, wo wir gezeigt haben, dass Luft ein Gewicht hat.
Vgl. Versuch 2 und 3

Womit kann man die Lufthülle (Atmosphäre) der Erde vergleichen?

Begründe, warum auf der Erdoberfläche ein großer Druck herrscht.

Was versteht man unter einem Vakuum?

Was würde mit einer Blechdose geschehen, wenn in ihr ein Vakuum herrschen würde?
Beschreibe und erkläre.

Lösungen zu Arbeitsblatt 2.2

Nenne Beispiele, an denen man erkennt, dass Luft ein Stoff ist.

Am Luftwiderstand, wenn man sich schnell bewegt bzw. fährt.

Beschreibe einen Versuch, wo wir gezeigt haben, dass Luft ein Stoff ist, der Raum benötigt.

Vgl. Versuch 1

Beschreibe einen Versuch, wo wir gezeigt haben, dass Luft ein Gewicht hat.

Vgl. Versuch 2 und 3

Womit kann man die Lufthülle (Atmosphäre) der Erde vergleichen?

Mit einem Luftmeer.

Begründe, warum auf der Erdoberfläche ein großer Druck herrscht.

Da wir uns auf dem Boden der 400 km hohen Lufthülle befinden, drückt diese mit ihrem gesamten Gewicht auf jeden Körper. Dieser Druck ist am tiefsten Punkt, nämlich auf der Erdoberfläche am Größten.

Was versteht man unter einem Vakuum?

Das ist ein Raum, in dem sich keine Luft mehr befindet bzw. in dem ein sehr starker Unterdruck herrscht.

Was würde mit einer Blechdose geschehen, wenn in ihr ein Vakuum herrschen würde?

Beschreibe und erkläre.

Sie würde vom äußeren Luftdruck zerquetscht werden, da sich in ihrem Inneren kein Stoff befindet (Luft oder Flüssigkeit), der dagegen drücken würde.

3. Auftrieb in Gasen

Hinweis: Die Schüler haben erfahren, dass Luft ein Stoff ist wie andere auch und dass man unsere Lufthülle mit einem Luftmeer vergleichen kann. Man könnte jetzt die Frage stellen, was denn mit einem Körper geschehen müsste, wenn er in dieses Luftmeer eintaucht. Vielleicht kommen sie auf den Zusammenhang mit Flüssigkeiten und erkennen, dass auch in Gasen Auftriebskräfte vorhanden sein müssen. Sollte dies nicht der Fall sein, kann mit gezielten Fragen auf diesen Zusammenhang hingearbeitet werden.

Versuch 1 (SV/LV)

Aufbau

Faden, 2 Luftballons, CO₂-Flasche

Durchführung

- Der erste Ballon wird normal mit Luft aufgeblasen.
- Der zweite Ballon wird genau so groß wie der erste Ballon mit CO₂ aufgeblasen.
- Beide Ballons werden aus möglichst großer Höhe (auf einen Stuhl stellen) gleichzeitig fallengelassen.

Beobachtung

Beide Ballons schweben zur Erde, wobei der mit CO₂ gefüllte Ballon deutlich schneller fällt.

Erklärung

Die Ballons verdrängen Luft – genau so, als ob sie sich in einer Flüssigkeit befinden würden – und erfahren dabei – genau wie in einer Flüssigkeit – eine Auftriebskraft. Da aber die Gewichtskraft des mit Luft gefüllten Ballons genauso groß wie seine Auftriebskraft ist und das Gewicht der Ballonhülle hinzukommt, sinkt der Ballon zu Boden. Für den mit CO₂ gefüllten Ballon gilt das Gleiche, wobei dieses Gas aber deutlich schwerer ist als Luft ($\rho \approx 2 \text{ g / dm}^3$), was sich durch die höhere Fallgeschwindigkeit bemerkbar macht.

Versuch 2 (LV)

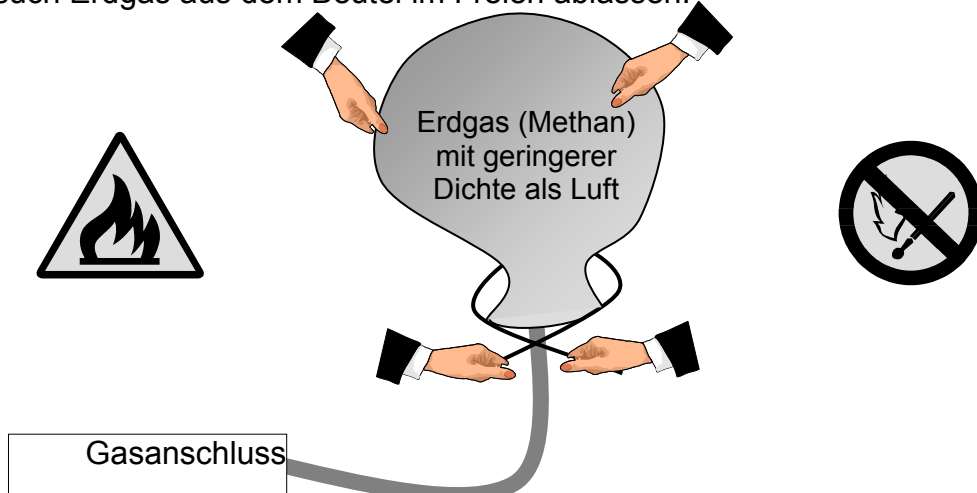
Aufbau

Faden, Kunststoffbeutel für Schulpapierkörbe, ca. 50 cm Gummischlauch, Faden, Gasanschluss

Durchführung

- Der Kunststoffbeutel wird glatt gestrichen.
- Der Kunststoffbeutel wird mit Hilfe des Schlauchstückes mit Erdgas gefüllt und dann mit Hilfe des Fadens unten zugebunden.
- Der Beutel wird losgelassen.

Nach dem Versuch Erdgas aus dem Beutel im Freien ablassen.



Beobachtung

Der mit Erdgas gefüllte Kunststoffbeutel schwebt nach oben an die Decke und bleibt dort für geraume Zeit.

Erklärung

Der mit Erdgas gefüllte Kunststoffbeutel verdrängt Luft – genau so, als ob er sich in einer Flüssigkeit befinden würden – und erfährt dabei – genau wie in einer Flüssigkeit – eine Auftriebskraft. Da aber die Gewichtskraft des mit Erdgas gefüllten Kunststoffbeutels geringer ist als seine Auftriebskraft, steigt er nach oben. Dies liegt daran, dass Erdgas, das zum größten Teil aus Methan besteht, eine Dichte von $\rho = 0,72 \text{ g / dm}^3$ besitzt, während Luft eine Dichte von $\rho = 1,3 \text{ g / dm}^3$ besitzt.

Beim Arbeiten mit Erdgas Sicherheitsvorschriften beachten und darauf achten, dass keine offenen Flammen oder Funken vorhanden sind.

Hinweis: Sollte sich unbrennbares Helium – was nicht sehr wahrscheinlich ist – in der Sammlung befinden, so ist dies dem leichtentzündlichen Wasserstoff vorzuziehen.

Versuch 3 (SV/LV)

Aufbau

Luftballon (möglichst groß), Faden, Wasserstoffflasche

Durchführung

- Der Ballon wird mit Wasserstoff gefüllt und zugeknotet (gut festhalten und am besten mit zwei Schülern je Ballon durchführen).
- Der Faden wird am Knoten fixiert.
- Das Fadenende wird festgehalten und der Ballon wird losgelassen.

Beim Arbeiten mit Wasserstoff Sicherheitsvorschriften beachten und darauf achten, dass keine offenen Flammen oder Funken vorhanden sind.

Wenn der mit Wasserstoff gefüllte Ballon nicht mehr benötigt wird, sollte er im Freien zerstört werden, wobei darauf zu achten ist, dass keine Flammen oder Funken vorhanden sind.



Beobachtung

Sobald der Ballon mit Wasserstoff gefüllt ist, steigt er nach oben und übt eine Zugkraft aus.

Erklärung

Der Ballon verdrängt Luft – genau so, als ob er sich in einer Flüssigkeit befinden würde – und erfährt dabei – genau wie in einer Flüssigkeit – eine Auftriebskraft. Die Berechnung der Auftriebskraft erfolgt nach dem archimedischen Prinzip, wonach die Auftriebskraft der Gewichtskraft der verdrängten Luft entspricht. Luft hat eine Dichte von $\rho = 1,3 \text{ g / dm}^3$ bzw.

$\rho = 1,3 \text{ g / Liter}$. Da der Ballon aber diesmal mit dem wesentlich leichteren Wasserstoffgas ($\rho = 0,09 \text{ g / dm}^3$, d.h. mehr als 14 mal leichter als Luft) gefüllt ist, erfährt er eine Auftriebskraft. Diese Auftriebskraft lässt sich wie folgt berechnen:

Gewichtskraft der Ballonhülle + Gewichtskraft der Wasserstofffüllung (Ballonvolumen) – Gewichtskraft der verdrängten Luft (Ballonvolumen).

Hinweis: Zu den Versuchen in diesem Abschnitt und in Abschnitt 5.5 wird eine empfindliche Waage benötigt. Dies kann entweder eine Briefwaage, eine Digitalwaage ($d = 1 \text{ g}$) oder für Demonstrationsversuche eine Tafelwaage sein.

Versuch 4 (SV)

Aufbau

Waage (entweder digital oder Briefwaage), Gewichtstück (ca. 50 – 100 g), Faden, Luftballon (möglichst groß), Wasserstoffflasche oder, wenn vorhanden, Heliumflasche, wenn möglich, den gasgefüllten Ballon von Versuch 2 wiederverwenden

Durchführung

- Das Gewicht wird auf die Waage gestellt und seine Masse ermittelt.
 - Der Ballon wird mit Wasserstoff gefüllt und zugeknötet (gut festhalten und am besten mit zwei Schülern je Ballon durchführen).
 - Der Faden wird am Knoten fixiert.
 - Das Fadenende wird festgehalten und am Gewicht, das auf der Waage steht, befestigt.
- Wenn der mit Wasserstoff gefüllte Ballon nicht mehr benötigt wird, sollte er im Freien zerstört werden, wobei darauf zu achten ist, dass keine Flammen oder Funken vorhanden sind.



Beobachtung

Sobald der Ballon an dem auf der Waage stehenden Gewicht befestigt ist, verringert sich dessen Gewichtskraft um ca. 3 – 6 g (die Verringerung der Gewichtskraft hängt von der Größe des Ballons ab).

Erklärung

Wie Versuch 3.

Hinweis: Die Schüler werden gefragt, ob sie solche Ballons oder Ähnliches schon einmal gesehen haben. Einige werden wahrscheinlich Luftschiffe bzw. Zeppeline nennen, während andere Heißluftballons ansprechen werden. Auf diese sollte näher eingegangen werden.

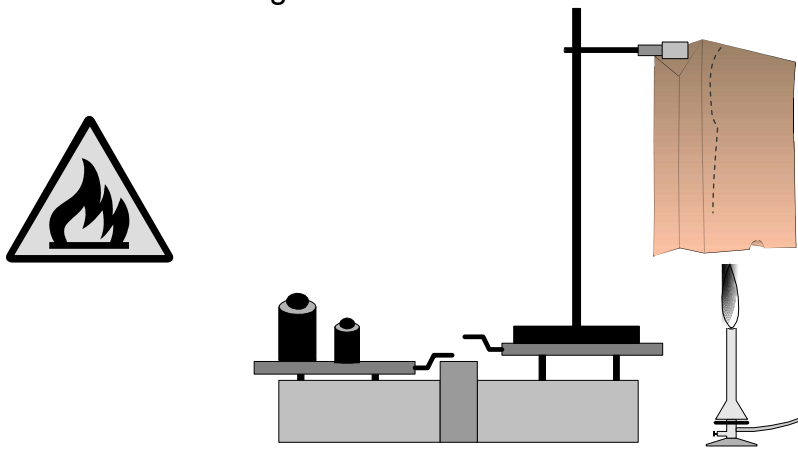
Versuch 5 (LV)

Aufbau

Tafelwaage, Stativ, Stativklemme, Doppelmuffe, Gasbrenner, große Papiertüte (keine Kunststofftüte!), Massestücke (kleines Becherglas mit Sand, Papierknäuel)

Durchführung

- Eine große Papiertüte, die weit geöffnet ist, wird mit Hilfe einer Stativklemme an einem Stativ befestigt. Dieses Stativ mit der daran befestigten Tüte wird auf eine Seite einer Tafelwaage gestellt. Anschließend wird die Tafelwaage mit Massestücken ins Gleichgewicht gebracht. Da eine Tafelwaage sehr empfindlich reagiert, können zur exakten Tarierung zusätzlich auch kleine Papierknäuel bzw. ein Becherglas mit Sand verwendet werden.
- Unter die Öffnung der Papiertüte wird ein Gasbrenner mit bläulich leuchtender Flamme gehalten. Es muss dabei aber darauf geachtet werden, dass die Tüte nicht anfängt zu brennen. Vorsicht Brandgefahr!



Beobachtung

Sobald heiße Abgase und heiße Luft in die Tüte strömen, bewegt sich die entsprechende Seite der Tafelwaage nach oben.

Erklärung

Vergleicht man zwei Gasmengen in zwei gleich großen, aber offenen Behältern mit unterschiedlichen Temperaturen, so stellt man fest, dass sich in dem Behälter mit dem erwärmten Gas weniger Moleküle befinden als in dem kälteren. Dadurch, dass sich Gasmoleküle, wenn sie erwärmt werden, schneller bewegen als im kalten Zustand, benötigen sie mehr Raum. In dem Behälter mit dem erwärmten Gas befinden sich daher weniger Gasteilchen, so dass die Dichte dieses erwärmten Gases geringer ist als die des kalten.

Verschlösse man beide Behälter, dann würde in dem Behälter mit dem erwärmten Gas der Druck ansteigen, da die schnellbewegten Moleküle den Behälter nicht verlassen könnten und somit eine stärkere Kraft auf die Behälterwände ausüben würden als die im kälteren Gefäß.



In dem Behälter mit dem kälteren Gas befinden sich mehr Gasmoleküle; das Gas hat also eine größere Dichte als das erwärmte Gas im anderen Behälter.

Kurz ausgedrückt: Heiße Gase sind leichter als kalte Gase.

Die heiße Luft bzw. die heißen Abgase in der Tüte sind leichter als die umgebende kühlere Luft, so dass ein Auftrieb entsteht. Da die Auftriebskraft nach oben gerichtet ist, wirkt auf die entsprechende Seite der Tafelwaage eine geringere Gewichtskraft als vorher und sie bewegt sich daher nach oben.

Versuch 6 (SV)

Aufbau

Stativ, Doppelmuffe, Stativklemme, Tiegelschale (möglichst kleiner Durchmesser), Metallrohr aus Sicherheitsgründen mindestens 30 cm lang, $\varnothing$ ca. 4 - 5 cm (kurze, unlackierte Metallbeine aus dem Baumarkt, zu einem Rohr gebogenes Weißblech, Wasserleitungsrohre aus Kupfer u.a. bieten sich als preiswerte Materialien an), feuerfeste Unterlage, sehr leichter Kunststoffbeutel für Schulpapierkörbe oder Ähnliches, Spiritus, Brennpaste oder Esbit, Streichhölzer, evtl. Sand

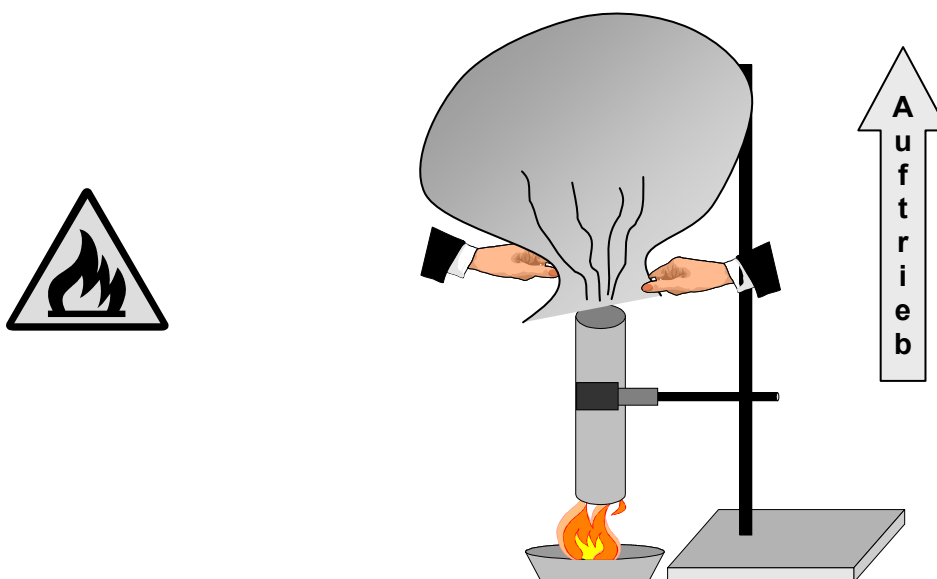
Durchführung

- Spirit, Brennpaste bzw. 2 Esbittabletten werden im Tiegel entzündet.
- Der Kunststoffbeutel wird unten mit der Hand so zusammengedrückt, dass eine trichterförmige Öffnung, die nicht zu klein sein darf, über die Öffnung des Rohres gehalten wird. Versuch mit zwei Schülern durchführen! Dieser Versuch lässt sich schnell und problemlos durchführen. Nachteilig ist, dass sich der mit Heißluft gefüllte Beutel mit der Öffnung nach oben drehen kann.

Darauf achten, dass Schüler keine Verbrennungsgase von Esbit einatmen!

Vorsicht! Rohr nicht berühren, da es sehr heiß werden kann. Müllbeutel von der offenen Flamme fernhalten, da der Kunststoff evtl. nicht schwer entzündlich ist.*

Tipp: Wenn Spiritus verwendet wird, Tiegelschale vorher mit sauberem Sand füllen, so dass der Sand den Spiritus aufnimmt und es zu keinerlei Brandgefahr kommt, wenn die Schale versehentlich umgestoßen wird.



*Andernfalls sind im Lehrmittelhandel auch schwerentflammable Folien zu einem höheren Preis erhältlich.

Beobachtung

Der mit heißem Gas gefüllte Kunststoffbeutel steigt hoch und sinkt dann langsam zu Boden.

Erklärung

Vgl. Versuch 5.

Ergänzung: Ein Heißluftballon hat ein Volumen von ca. 4000 m^3 und eine maximale Startmasse von ca. 1300 kg ; die heiße Luft, bzw. die heißen Abgase besitzen eine mittlere Dichte von $0,5 \text{ kg / m}^3$. Die Dichte der heißen Luft ist also $0,8 \text{ kg / m}^3$ geringer als die der kalten. Die daraus resultierende Auftriebskraft des Ballons beträgt dann $4000 \cdot 8 \text{ N} = 32000 \text{ N}$ (Auftriebskraft der verdrängten Luft – Gewichtskraft des Ballons = tatsächliche Auftriebskraft). Dies sind natürlich nur sehr ungefähre bzw. theoretische Werte, da der Auftrieb von Außentemperatur und Flughöhe beeinflusst wird.

Hinweis: Die folgenden Versuche entsprechen in der Intention dem Versuch 5 (daher auch die Nummerierung). Sie sind zum Teil wesentlich aufwändiger, dafür aber effektiver und dürften bei den Schülern mehr Begeisterung hervorrufen. Je nach zeitlichem Rahmen kann unter verschiedenen Schwierigkeitsgraden gewählt werden. Positiv zu sehen ist, dass hier die Schüler in Teamarbeit das Versuchsmaterial selbst erstellen müssen.

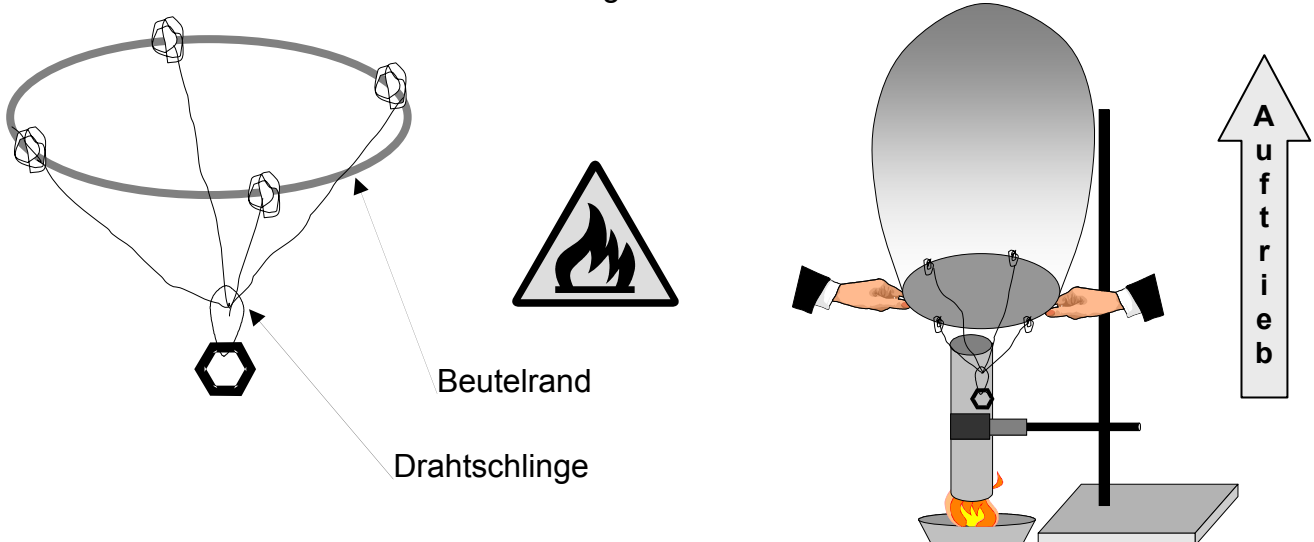
Versuch 6a (SV)

Aufbau

Wie Versuch 6, dazu ca. 2 m Zwirnsfaden, Schere, kleine Schraubenmutter (ca. $4 - 5 \text{ g}$), ca. 4 cm Bindendraht, Kombizange

Durchführung

- Der Müllbeutel wird voll entfaltet, glattgestrichen und es werden in den unteren Rand vier Knoten in gleichem Abstand gemacht.
- An diese Knoten werden vier Zwirnsfäden von ca. 40 cm Länge geknotet.
- Die Enden der Zwirnsfäden werden so verknotet, dass der Knoten mittig über der Öffnung des Beutels positioniert ist.
- An dem Knoten wird die Schraubenmutter mit einer kleinen Drahtschlinge befestigt.
- Der Beutel wird jetzt, genau wie bei Versuch 5, mit heißem Gas gefüllt und bei entsprechendem Auftrieb losgelassen. Durch die unten hängende Schraubenmutter wird er besser stabilisiert als in Versuch 5 und steigt senkrecht nach oben.



Beobachtung

Der mit heißem Gas gefüllte Kunststoffbeutel steigt jetzt senkrecht hoch und sinkt dann langsam zu Boden.

Erklärung

Vgl. Versuch 5.

Versuch 6b (SV)

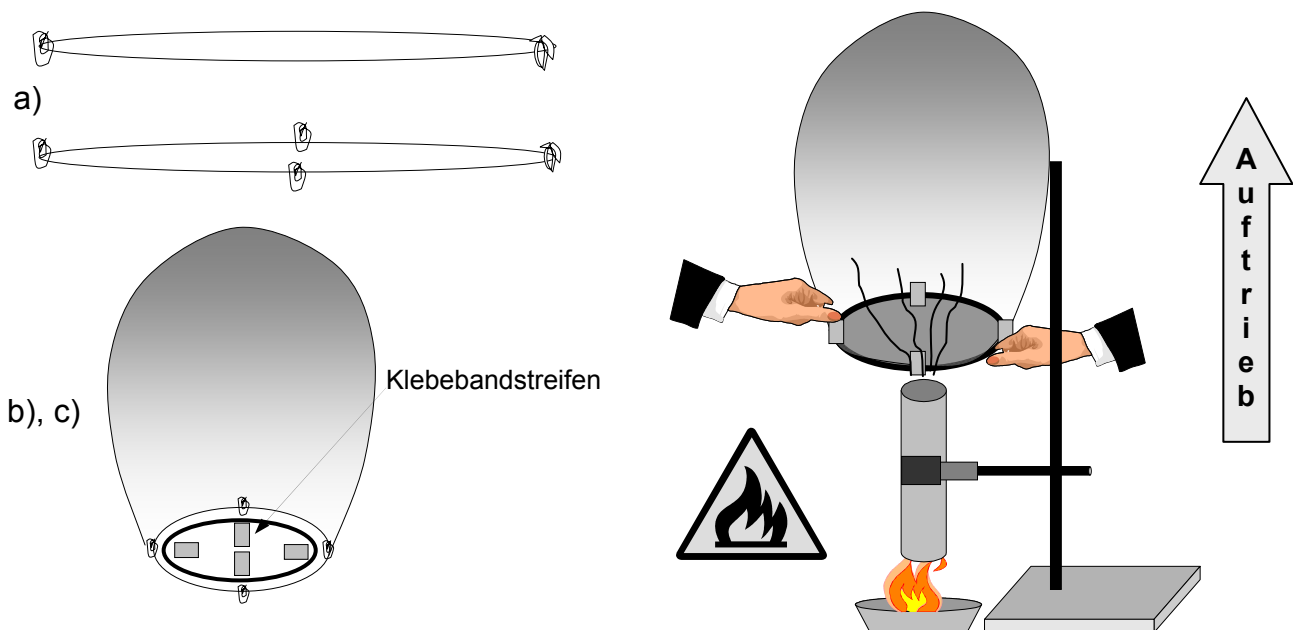
Aufbau

Wie Versuch 6a, dazu ca. 1 m dünner Bindendraht, Kombizange, Klebeband

Durchführung

- Der Müllbeutel wird voll entfaltet, glattgestrichen und es werden in den unteren Rand vier Knoten in gleichem Abstand gemacht. Dies sorgt dafür, dass der Rand des Beutels etwas stabilisiert wird (vgl. Versuch 6a). **Es ist darauf zu achten, dass die Öffnung möglichst groß ist.**
- Aus ca. 90 cm Bindendraht wird ein Ring mit ca. 30 cm Durchmesser angefertigt, indem die Drahtenden übereinander gelegt und mit einer Kombizange verdreht werden.
- Dieser Drahtring wird einige Zentimeter in die Öffnung des Beutels geschoben, der Rand des Beutels wird nach innen um den Drahtring eingeschlagen und an den Knoten, die für Stabilität sorgen, mit Hilfe kurzer Klebebandstreifen mit dem Beutel verklebt; ggf. kann der Rand an weiteren Punkten verklebt werden.
- Der Beutel, der jetzt eine stabile Öffnung hat und durch das Gewicht des Drahtringes Stabilität bekommen hat, wird mit der Öffnung über das Rohr gehalten, mit heißer Luft bzw. Abgasen gefüllt und anschließend losgelassen.

Vorsicht! Rohr nicht berühren, da es sehr heiß werden kann. Müllbeutel von der offenen Flamme fernhalten, da der Kunststoff nicht schwer entzündlich ist.



Beobachtung

Der mit heißem Gas gefüllte Kunststoffbeutel steigt senkrecht hoch und sinkt dann langsam zu Boden.

Erklärung

Vgl. Versuch 5.

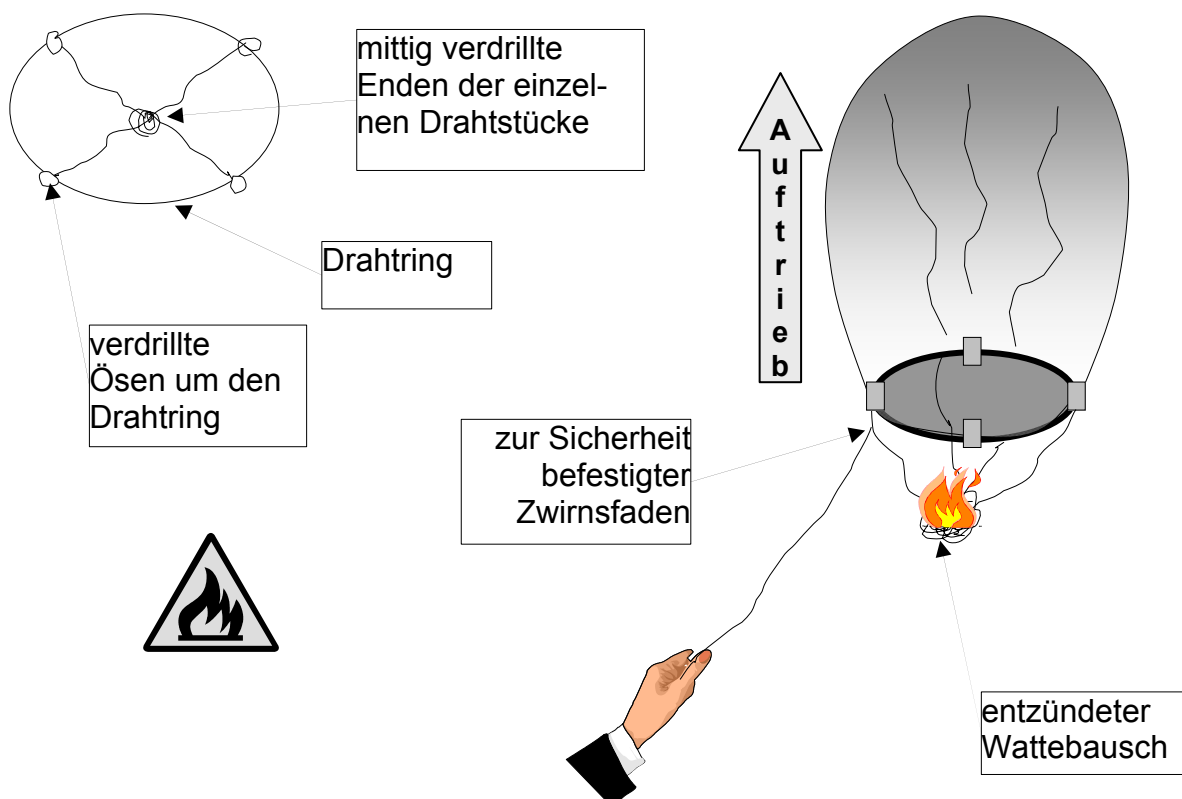
Versuch 6c (SV)

Aufbau

Wie Versuch 6b, mit ca. 2 m dünnem Bindendraht, Rolle Zwirnsfaden, Klebeband, Wattebausch (evtl. Kosmetikwatte), Spiritus, Streichhölzer

Durchführung

- a) Versuch 6b a) – c)
- b) Aus dem restlichen Bindendraht werden 4 Stücke von ca. 20 – 25 cm Länge geschnitten und in gleichen Abständen am Draht ring befestigt (der Draht wird durch den Kunststoff des Beutels gestoßen und mit einer Kombizange zu einer kleinen Schlinge verdreht).
Vorsicht! An den spitzen Enden der Bindendrahtstücke kann man sich verletzen.
- c) Die freien Enden werden so miteinander verdreht, dass der Kreuzungspunkt über dem Ringmittelpunkt liegt.
- d) An einem der Drahtstücke wird ein langer Zwirnsfaden (10 m oder länger) befestigt.
- e) An den verdrehten freien Enden wird ein Wattebausch befestigt und mit etwas Spiritus getränkt (vorsichtig dosieren!). Spiritusflasche in größerem Abstand beiseite stellen.
- f) Der Beutel wird von einem Schüler hoch gehalten, während ein anderer den spiritusgetränkten Wattebausch entzündet. Vorsicht Verbrennungsgefahr! Wenn der Beutel prall ist und genügend Auftrieb besitzt, wird er losgelassen.



Bei diesem Versuch ist streng darauf zu achten, dass

- Leiterinnen und Leiter dafür verantwortlich sind, dass Schüler vorsichtig mit Brennspritus umgehen und ihn nicht aus der Flasche in offenes Feuer schütten
- er nach Möglichkeit im Freien durchgeführt wird
- wenn er in einem Gebäude durchgeführt wird, dieses keine brennbaren Materialien enthält und dass für ausreichend Löschmittel gesorgt wird
- er auf einem großen Platz durchgeführt wird, auf dem sich keine brennbaren Materialien befinden und ggf. Eimer mit Löschwasser bereitgehalten werden
- der aufsteigende Beutel mit einem daran befestigten langen Zwirnsfaden nicht unkontrolliert abtreiben kann, da größere Höhen erreicht werden können
- ein Sicherheitsabstand zu in der Nähe befindlichen Gebäuden eingehalten wird
- er nie in Gegenden mit Waldbrandgefahr durchgeführt wird

Beobachtung

Der mit heißen Verbrennungsgasen gefüllte Kunststoffbeutel steigt hoch und sinkt erst wieder, wenn der Spiritus verbrannt ist.

Erklärung

Vgl. Versuch 5.

Hinweis: Wem der Versuch 6 zu aufwändig ist, kann mit dem folgenden Versuch, der wesentlich einfacher ist, die gleiche Erkenntnis, dass warme Luft leichter ist als kalte, bei den Schülern bewirken.

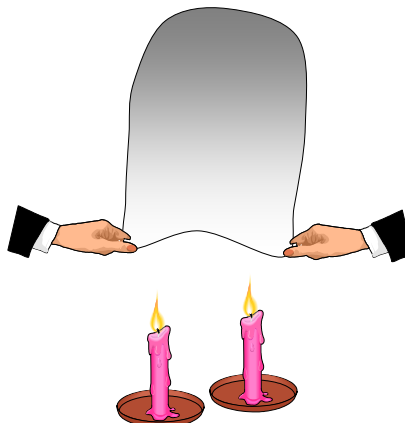
Versuch 7 (SV)

Aufbau

2 oder 3 Kerzen, Kerzenständer, Gemüsebeutel (das sind die Tüten, die die in der Gemüseabteilung von Supermärkten von der Rolle abgezogen werden)

Durchführung

- a) 2 oder 3 Kerzen werden auf Ständern fixiert und entzündet.
- b) 2 Schüler halten die Öffnung des Beutels dicht über die Kerzenflammen.
Vorsicht! Nicht zu dicht mit dem Beutel an die Flammen kommen!
- c) Wenn die Tüte prall mit der heißen Luft gefüllt ist, wird sie losgelassen.



Beobachtung

Die Tüte steigt langsam nach oben.

Erklärung

Vgl. Versuch 5.

Hier noch einige Bilder des Autors, die anlässlich dieses Projekts in einer 6. Klasse aufgenommen wurden.



Hinweis: Zur Vertiefung kann auf den ersten Ballonflug der Brüder Montgolfier im Jahre 1783 mit einem Heißluftballon eingegangen werden ebenso wie auf Ballonflüge mit wasserstoffgefüllten Ballons, die im gleichen Jahr von Professor J. A. C. Charles durchgeführt wurden, eine Entwicklung, die dann im 20. Jahrhundert mit den verschiedenen Luftschifftypen (Zeppelin) endete.

Hingewiesen werden sollte auch auf das Luftschiff „Hindenburg“, das im Jahre 1937 bei einem spektakulären Unfall in Lakehurst bei New York verbrannte (dazu gibt es Film- bzw. Videomaterial).

Wenn heute wieder Luftschiffe gebaut werden, dann füllt man sie mit dem unbrennbaren Edelgas Helium, das eine etwas größere Dichte als Wasserstoff besitzt. ($\rho = 0,18 \text{ g / dm}^3$), aber immer noch siebenmal leichter als Luft ist.

3. Auftrieb in Gasen

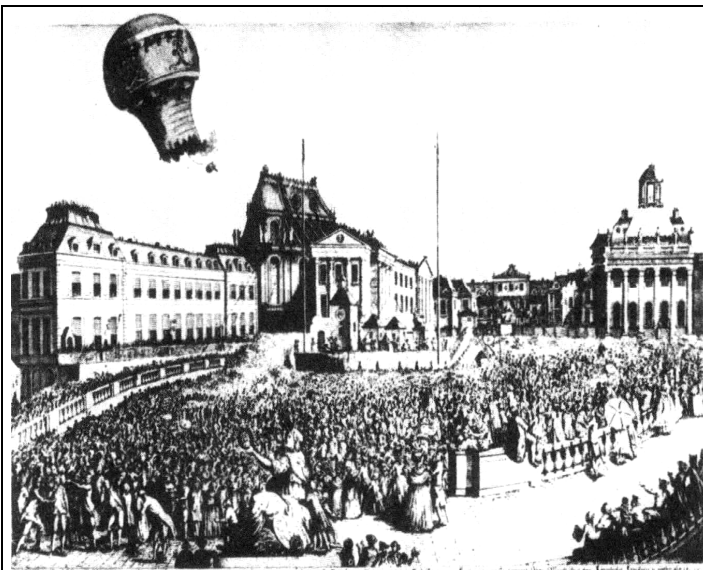
Wenn sich ein Körper in der **Lufthülle** befindet, dann erfährt er – genau wie in einer Flüssigkeit – eine **Auftriebskraft**, die auch als **statischer Auftrieb** bezeichnet wird.

Ist ein Körper

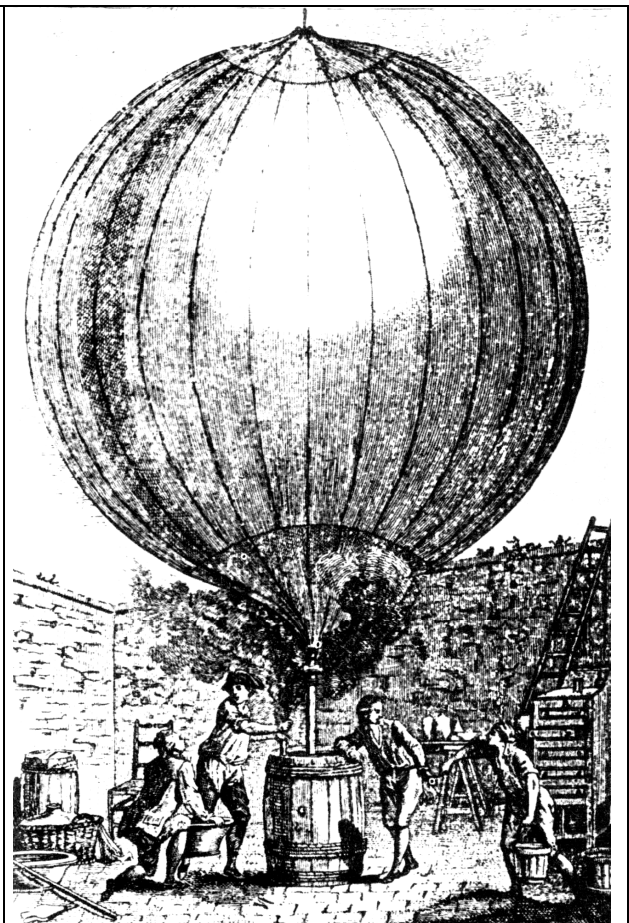
- **leichter** als die verdrängte Luft, **fliegt er nach oben**, da seine Gewichtskraft geringer ist als die Auftriebskraft
- **schwerer** als die verdrängte Luft, **sinkt** bzw. fällt er **nach unten**, da seine Gewichtskraft größer ist als die Auftriebskraft

Körper sind besonders leicht, wenn sie mit **Wasserstoff, Helium oder sehr heißer Luft bzw. heißen Gasen** gefüllt sind, da diese Gase **wesentlich leichter** als normal temperierte Luft sind.

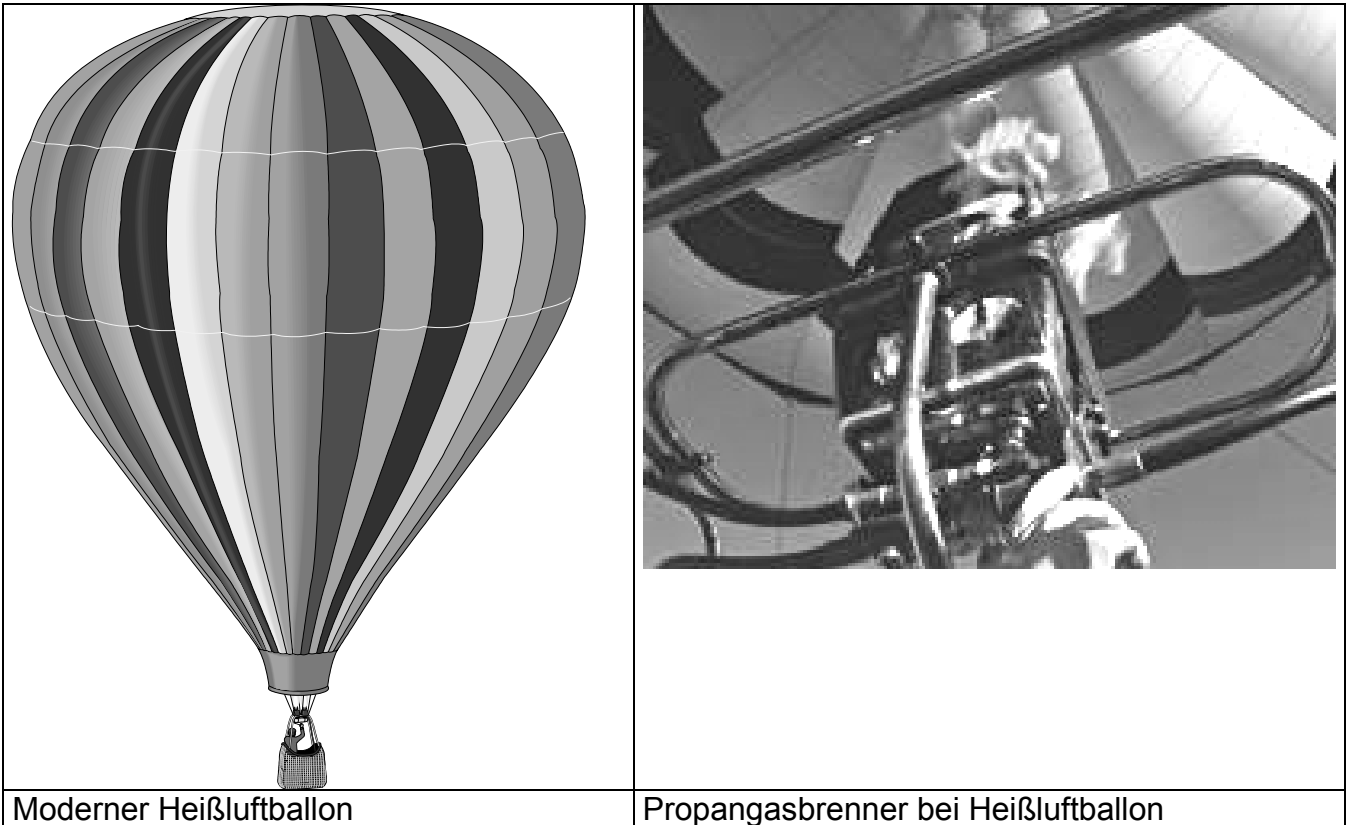
Im Jahre **1783** wurde von den **Brüdern Montgolfier** der erste Flug mit einem **Heißluftballon** durchgeführt. Im gleichen Jahr fand auch der erste Flug eines mit Wasserstoff gefüllten Ballons statt.



Erster Start des Heißluftballons der Brüder Montgolfier in Paris im Jahre 1783

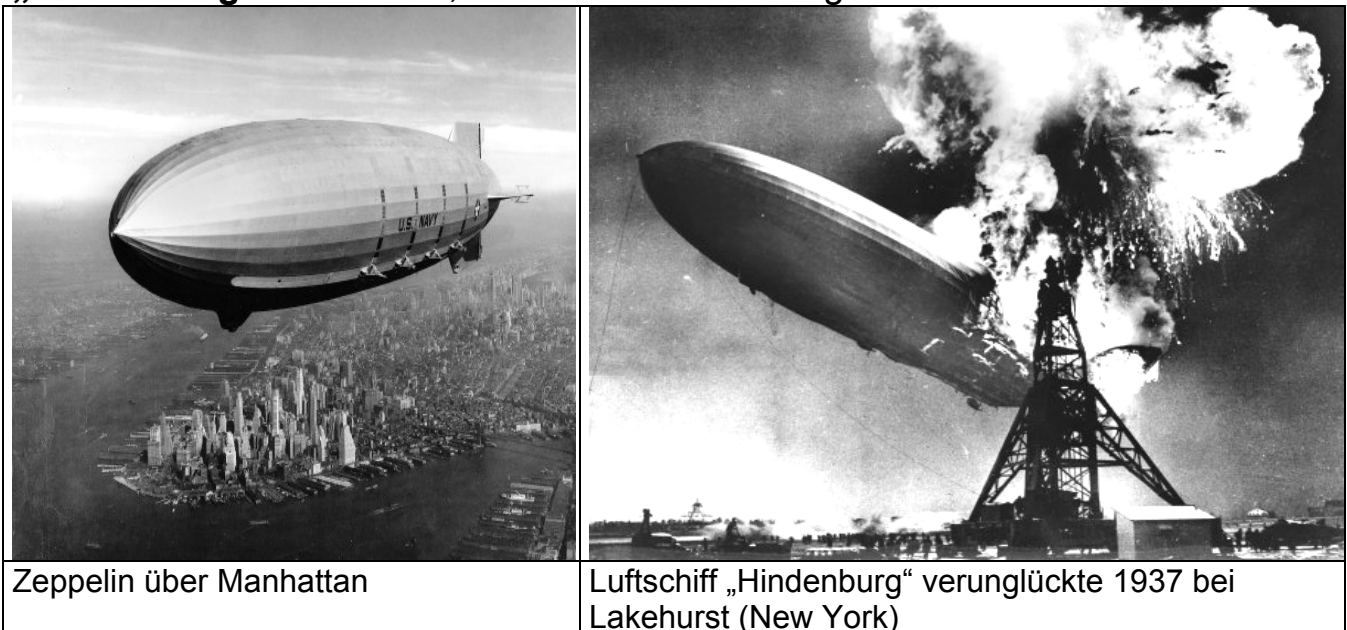


Erster mit Wasserstoff gefüllter Ballon im Jahre 1783 von J. Charles



Die mit Wasserstoff gefüllten Ballons wurden zu **lenkbaren Luftschiffen** (Zep-
 pelin) weiterentwickelt.

Durch das Unglück in Lakehurst im Jahre 1937, bei dem der Zeppelin
 „**Hindenburg**“ verbrannte, kam es zur Einstellung der Luftschiffahrt.



Moderne Luftschiffe, die heute wieder in kleiner Stückzahl gebaut werden, füllt man mit dem **unbrennbaren Edelgas Helium**, das etwas schwerer als Wasserstoff ist.

Beschreibe und zeichne den Versuch, wo gezeigt wurde, dass ein wasserstoffgefüllter Ballon eine Auftriebskraft besitzt.

--

--

--

Beschreibe und zeichne den Versuch, wo gezeigt wurde, dass ein mit Heißluft gefüllter Kunststoffbeutel eine Auftriebskraft besitzt.

--

--

Wie groß ist die Dichte von jeweils 1 Liter (1 dm^3) Wasserstoff, Luft und Helium?

--

Warum steigt über einem Feuer heiße Asche nach oben?

--

Erkläre, warum ein mit Luft gefüllter Ballon zu Boden sinkt, während ein mit Wasserstoff gefüllter Ballon nach oben steigt. Denke dabei an das archimedische Prinzip.

Die größte Höhe, die ein Ballon jemals erreicht hat, liegt bei ca. 50 km. Erkläre, warum es nicht möglich ist auf beispielsweise 80 km oder mehr zu kommen.

Begründe, ob auf einem Planeten, der eine Wasserstoffatmosphäre besitzt ein Ballon aufsteigen kann.

a) Warum ist Wasserstoff zur Füllung von Ballons besser geeignet als Helium?

b) Welchen schwerwiegenden Nachteil hat Wasserstoff als Füllgas für Ballons?

Lösungen zu Arbeitsblatt 3.3

Beschreibe und zeichne den Versuch, wo gezeigt wurde, dass ein wasserstoffgefüllter Ballon eine Auftriebskraft besitzt.

Vgl. Versuch 2, 3

Beschreibe und zeichne den Versuch, wo gezeigt wurde, dass ein mit Heißluft gefüllter Kunststoffbeutel eine Auftriebskraft besitzt.

Vgl. Versuch 4

Wie groß ist die Dichte von jeweils 1 Liter (1 dm³) Wasserstoff, Luft und Helium?

Wasserstoff: $\rho = 0,09 \text{ g}$; Luft: $\rho = 1,3 \text{ g}$; Helium: $\rho = 0,18 \text{ g}$

Warum steigt über einem Feuer heiße Asche nach oben?

Die Luft über dem Feuer ist sehr heiß und somit sehr leicht. Sie besitzt daher einen großen Auftrieb und reißt Ascheteilchen mit sich.

Lösungen zu Arbeitsblatt 3.4

Erkläre, warum ein mit Luft gefüllter Ballon zu Boden sinkt, während ein mit Wasserstoff gefüllter Ballon nach oben steigt. Denke dabei an das archimedische Prinzip.

Der luftgefüllte Ballon verdrängt genauso viel Luft wie sein Volumen beträgt. Auftrieb und Gewicht sind daher gleich, wobei aber noch das Gewicht der Ballonhülle hinzukommt, der Ballon sinkt daher zu Boden. Der wasserstoffgefüllte Ballon ist wesentlich leichter als das verdrängte Luftvolumen einschließlich der Ballonhülle; es kommt also zu einem Auftrieb.

Die größte Höhe, die ein Ballon jemals erreicht hat, liegt bei ca. 50 km. Erkläre, warum es nicht möglich ist auf beispielsweise 80 km oder mehr zu kommen.

Je höher der Ballon steigt, desto geringer wird die Dichte der umgebenden Luft, d.h. die verdrängte Luftmasse hat ein immer geringeres Gewicht, so dass die daraus resultierende Auftriebskraft immer geringer wird. In einer bestimmten Höhe ist der Unterschied zwischen Gewichtskraft und Auftriebskraft null, daher kommt es zu keinem weiteren Anstieg. Ein weiterer Grund ist, dass auf Grund des immer geringeren Außendrucks die Ballonhülle irgendwann platzen kann.

Begründe, ob auf einem Planeten, der eine Wasserstoffatmosphäre besitzt ein Ballon aufsteigen kann.

Da es keinen leichteren Stoff als Wasserstoff gibt, kann in einer Wasserstoffatmosphäre kein Ballon aufsteigen, denn eine Auftriebskraft entsteht nur dort, wo ein leichter Körper einen schwereren Stoff verdrängt.

a) Warum ist Wasserstoff zur Füllung von Ballons besser geeignet als Helium?

Wasserstoff ist ca. 14mal leichter als Luft, während Helium nur 7mal leichter als Luft ist.

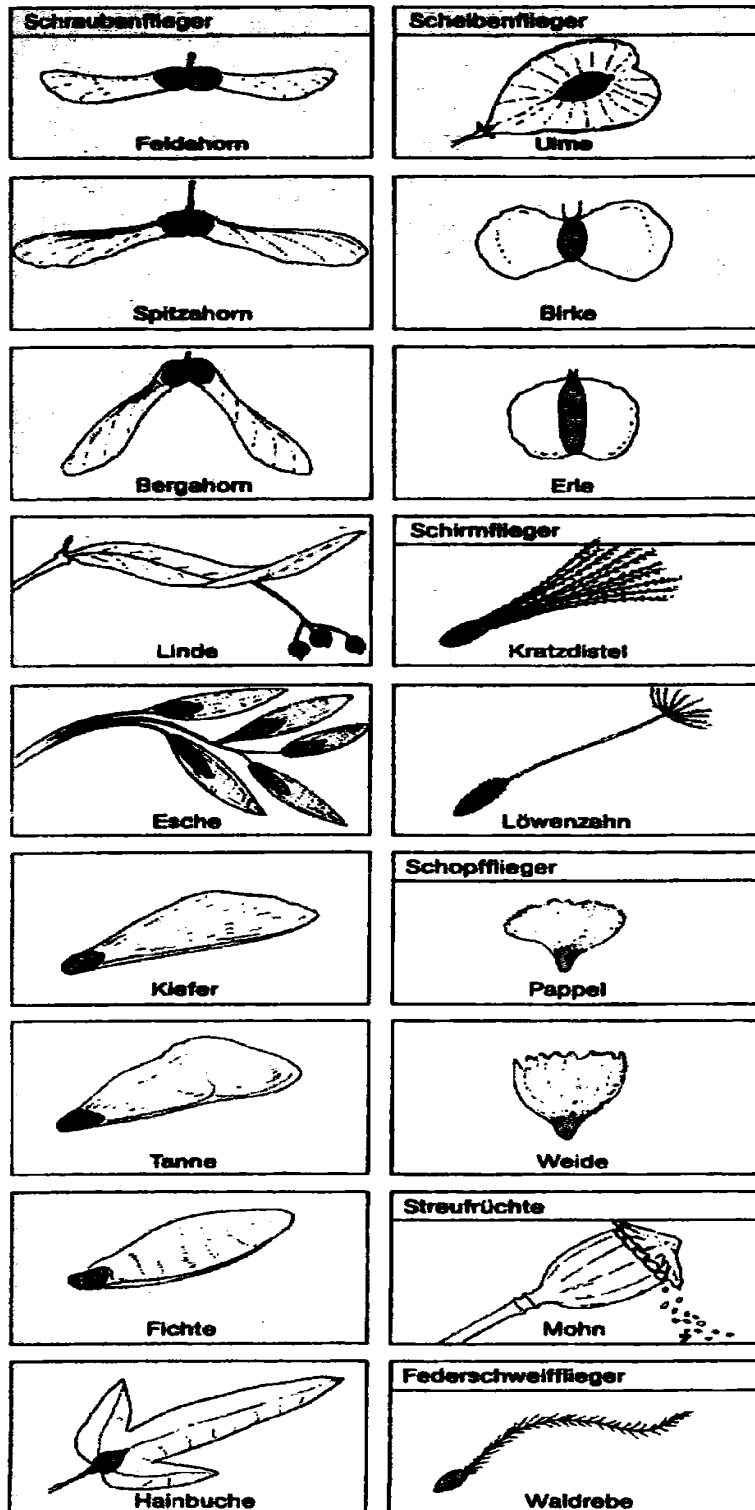
b) Welchen schwerwiegenden Nachteil hat Wasserstoff als Füllgas für Ballons?

Es ist leicht brennbar.

4. Natur als Vorbild für Flugobjekte

Hinweis: Um seinen Traum vom Fliegen wahr werden zu lassen, benutzte der Mensch wiederholt die Natur als Vorlage. Insbesondere die flugfähigen Samen erregten seine Aufmerksamkeit, da sie auf Grund ihrer Form durch den Wind zum Teil kilometerweit fortgetragen werden, und sie inspirierten ihn zu vielfältigen Umsetzungsversuchen mit technischen Mitteln.

Hinweis: Verschiedene zuvor gesammelte Flugsamen sollten den Ausgangspunkt für die nachfolgende Versuchsreihe bilden. Sind die Samen nicht verfügbar, kann selbstverständlich auch nur mit den selbstgebastelten Modellen gearbeitet werden.



Versuch 1 (SV)

Aufbau

Verschieden flugfähige Samen, Stoppuhr

Durchführung

Die flugfähige Samen – und zum Vergleich ein Same ohne Anhängsel – werden aus erhöhter Position (Stuhl, Tisch, Leiter oder Schultreppenhaus) fallen gelassen. Ihr Fallen wird beobachtet und es wird evtl. die Fallzeit gestoppt.

Beobachtung

Die flugfähigen Samen gelangen viel langsamer zu Boden als die Samen ohne Anhängsel.

Erklärung

Den Flugsamen wird ihr Gleiten, Segeln oder durch die Luft „Schrauben“ erst durch ausge dehnte Fortsätze (Schirm, Haarbildung oder Tagflächen) möglich, indem die Fläche vergrößert und dadurch die Sinkgeschwindigkeit verringert wird.

Im luftleeren Raum fallen alle Körper gleich schnell, d.h. Masse und Form spielen keine Rolle, die Fallgeschwindigkeit berechnet sich daher nach der Formel $v = g \cdot t$ (v : Fallgeschwindigkeit, g : Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$, d.h. ein frei fallender Körper erhöht in jeder Sekunde seine Fallgeschwindigkeit um diesen Wert; dies gilt aber nur bei Nichtberücksichtigung des Luftwiderstands), t : Fallzeit)

Fällt ein Körper dagegen in der Atmosphäre, dann wird er durch die Reibungskraft (allgemein Strömungswiderstand) der Luft abgebremst. Die Reibungskraft hat folgende Formel

$$F = \frac{c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2}{2} \quad (c_w: \text{Widerstandsbeiwert des fallenden Körpers - wird experimentell entwickelt), } \rho: \text{Dichte der Luft, } A: \text{Querschnittsfläche des Körpers, } v: \text{Fallgeschwindigkeit.}$$

Die Fallgeschwindigkeit in Luft, berechnet sich unter Einbeziehung der Reibungskraft nach folgender Formel $v \approx \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot A}}$ (m : Masse des Körpers).

In der letzten Formel wird deutlich, dass sich die Fläche des fallenden Körpers umgekehrt proportional zu seiner Fallgeschwindigkeit verhält.

Hinweis: Bereits vor über 500 Jahren hat Leonardo da Vinci einen funktionsfähigen Fallschirm gezeichnet, der in heutiger Zeit nachgebaut und erfolgreich erprobt wurde. Den ersten Fallschirmsprung aus großer Höhe (ca. 1000 m) wagte Jaques Gamerin von einer Montgolfière aus über Paris. Der erste nachweisbare Absprung mit einem Fallschirm wurde 1783 von S. Lenormand durchgeführt. Auch hier, nimmt man an, waren Flugsamen – evtl. der Löwenzahn – das Vorbild für den Fallschirm.

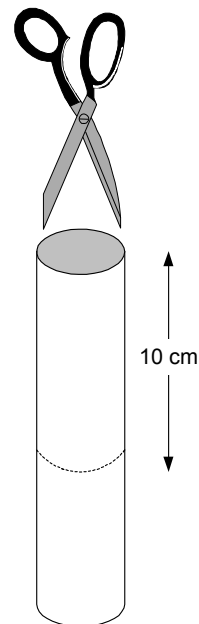
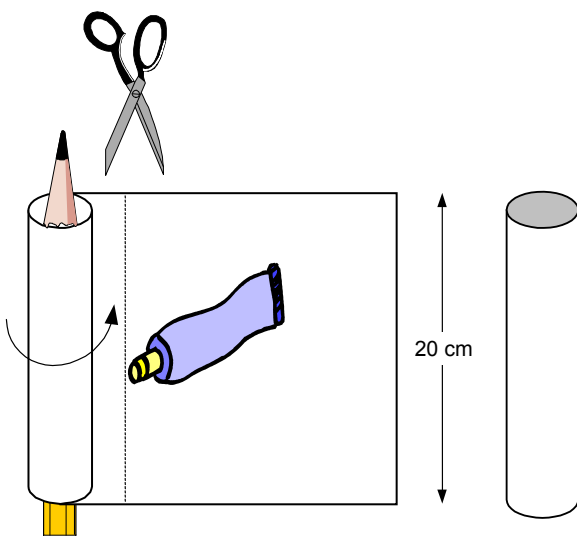
Versuch 2 (SV)

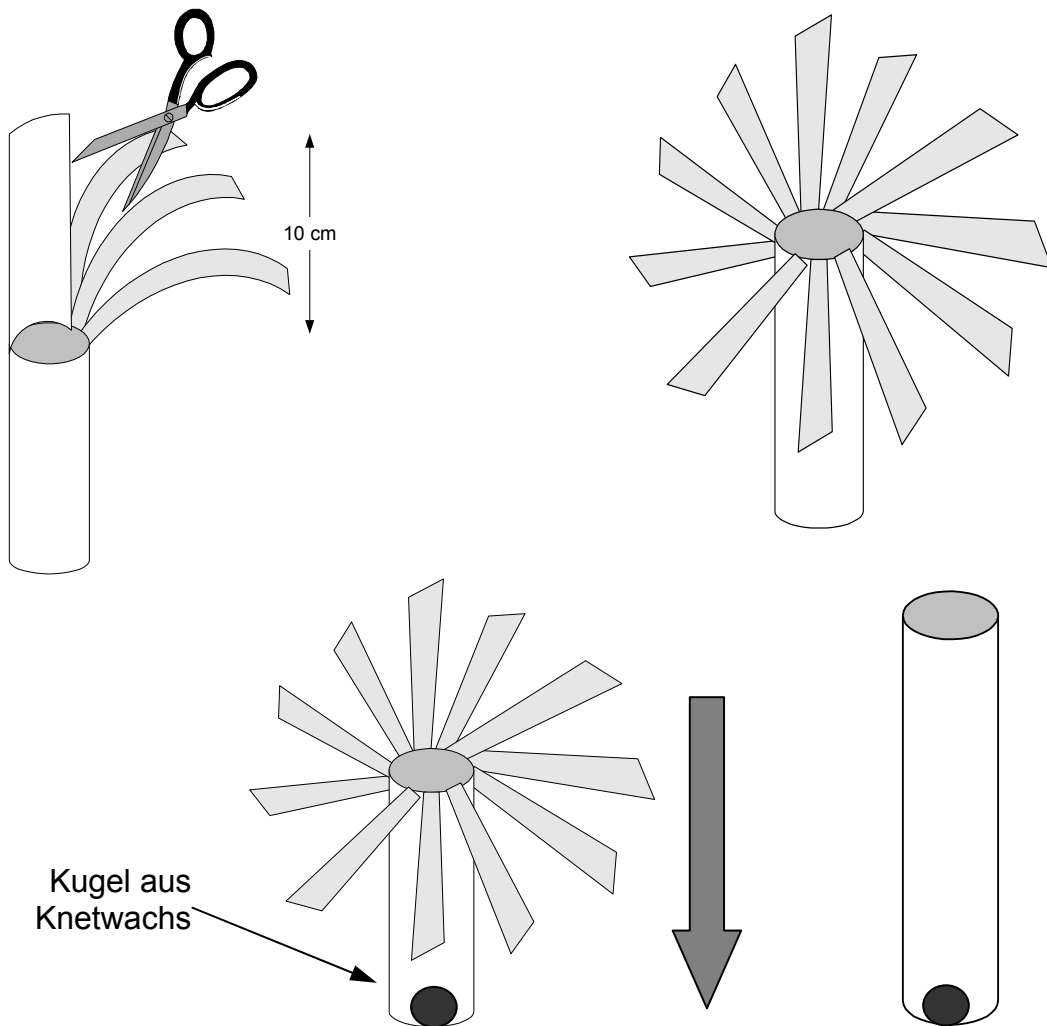
Aufbau

Blatt Schreibpapier, alternativ ein Kunststofftrinkhalm mit großem Durchmesser, langer Bleistift, spitze Schere, Alleskleber, evtl. etwas Knetwachs

Durchführung

- a) Um den Bleistift wird die lange Seite des Blattes zu einer Röhre gedreht und der Rand mit Klebstoff am übrigen Blatt fixiert.
- b) Nach Trocknung des Klebstoffs wird die entstandene Papierröhre mit der Schere abgetrennt.
- c) Aus dem restlichen Papierstück wird auf diese Weise eine zweite Röhre hergestellt.
- d) Die Mitte der ersten Röhre wird markiert und die obere Hälfte der Röhre wird mit der Schere vom Ende her in möglichst viele Schmale Streifen geschnitten.
- e) Die entstandenen Papierstreifen werden anschließend einzeln von der Mitte aus waagrecht umgeknickt.
- f) Beide Röhren – die bearbeitete und die unbearbeitete – werden aus erhöhter Position (Stuhl, Tisch, Leiter oder Schultreppenhaus) fallen gelassen. Ihr Fallen wird beobachtet und es wird evtl. die Fallzeit gestoppt.
- e) Will man bei diesem Versuch analog auch den eigentlichen Samen (die Masse des Samens) mit berücksichtigen, so lässt sich dies bewerkstelligen, indem man z.B. eine kleine Kugel aus Knetwachs am unteren Ende der Röhre anbringt.





Beobachtung

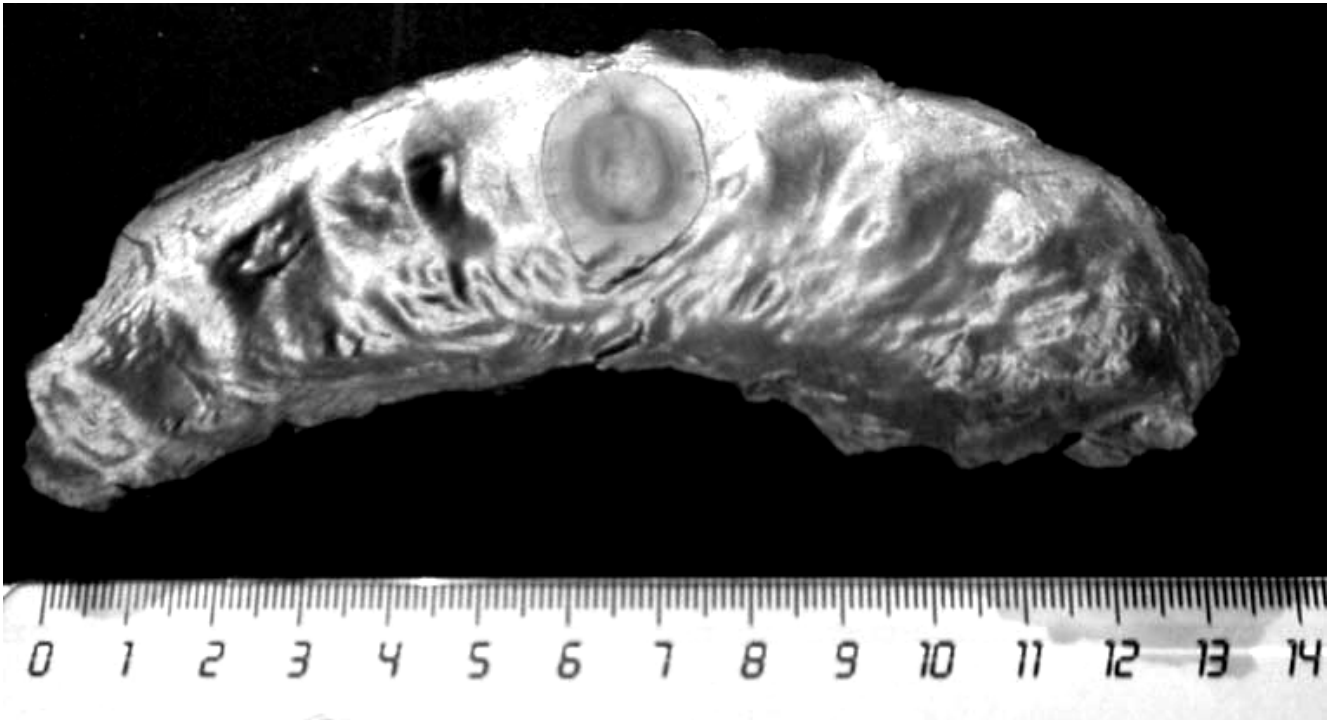
Die zum Schirm umgearbeitete Röhre schwebt langsam zu Boden, während die unbearbeitete Röhre schnell zu Boden fällt.

Erklärung

Vgl. Versuch 1.

*Hinweis: Die Ausbildung hautartiger Anhängsel an den Samen führt zu einem verzögerten Fall, so dass sie sich durch die Luft „schrauben“ wie z.B. Ahorn- und Lindensamen oder durch die Luft segeln wie z.B. Birken- und Ulmensamen. Als wohl bester Flieger bzw. Gleiter im Pflanzenreich gilt der Zanoniasame. Das ist der Samen einer Lianenart, die hoch auf tropischen Urwaldbäumen wächst. Der Samen ist geflügelt, hat eine Spannweite von ca. 14 – 16 cm; seine Flügelenden sind leicht angehoben, so dass er eine sehr stabile Fluglage aufweist. Wenn die reife Frucht aufspringt und der Samen herausfällt, geht er dank seiner besonders geformten Flügel sofort in einen aerodynamisch stabilen Gleitflug über und schwebt in eleganten Wellenbewegungen aus dem Schatten des Baumes heraus und landet so (vielleicht) auf einem Platz außerhalb des Schattens des Mutterbaumes, wo er mit Hilfe des Sonnenlichts schließlich zu keimen beginnt.**

* Es ist eventuell möglich, einige Exemplare des Samens über die Angewandte Botanik / Botanischer Garten Hamburg zu beziehen.



Zanoniasame

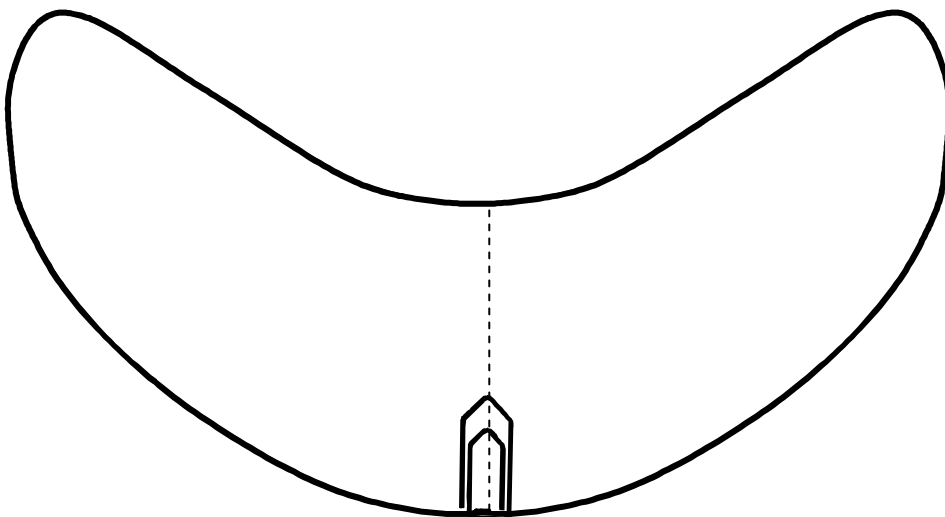
Versuch 3 (SV)

Aufbau

Schablone eines Zanoniasamens (vgl. Kopiervorlage), Blatt Papier, Bleistift, Büroklammer, Schere

Durchführung

- Nachfolgende Schablone verwenden und die Umrisse mit einem Bleistift auf einem Papierblatt nachzeichnen bzw. Schablone unter das Blatt legen und durchpausen.
- Auf den Anfang der markierten Mittelachse eine Büroklammer schieben.
- Das Flugsamen-Modell beim Start hinten in der Mitte halten und aus erhöhter Position (Stuhl, Tisch, Leiter oder Schultreppenhaus) fallen lassen.
- Falls das Samenmodell nicht einwandfrei durch die Luft gleitet, Büroklammer etwas drehen bzw. verschieben.



Beobachtung

Die Flugsamen-Modelle halten sich längere Zeit in der Luft und gleiten meist nach einer längeren Flugbahn langsam zu Boden.

Erklärung

Durch die großen (Trag)flächen wird die Sinkgeschwindigkeit in der Luft erheblich verringert (vgl. Erklärung Versuch 1). Optimiert wird das Flugverhalten des Samens durch die leichte Pfeilung der Tragflächen und den nach vorn verlegten, zentrierten Schwerpunkt.

Auf Grund dieser hervorragenden Flugeigenschaften können Zanon-Samen unter günstigen Bedingungen und Windverhältnissen kilometerweit segeln.

Ein kluger Ingenieur, der Österreicher Igo Etrich, hatte über diesen Sachverhalt gelesen, sich den Samen beschafft, die Formgebung der Flügel gründlich studiert und, ohne das Geheimnis aerodynamisch erklären zu können, ein recht erfolgreiches Flugzeug geschaffen. Die „Etrich-Taube“ war bis zum 1. Weltkrieg eines der sichersten und beliebtesten Flugzeuge. Sie wurde ab 1910 von den Rumpler-Werken (Berlin) in Lizenz gebaut („Rumpler-Etrich-Taube“).

Hinweis: Welche Phänomene gibt es noch, bei denen sich Körper durch die Luft bewegen? Eventuell kommen die Schüler auf Fallschirmspringer.

Hinweis: Wer schafft es,

- a) *den Fall einer Schraubenmutter aus 2 m Höhe länger als 2 Sekunden hinauszuzögern*
- b) *ein Reagenzglas (bzw. einen anderen fragilen Gegenstand) aus 2 m Höhe unversehrt auf dem Boden landen zu lassen*

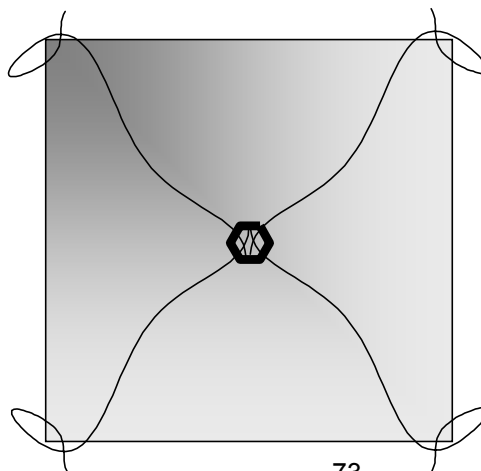
Versuch 4 (SV)

Aufbau

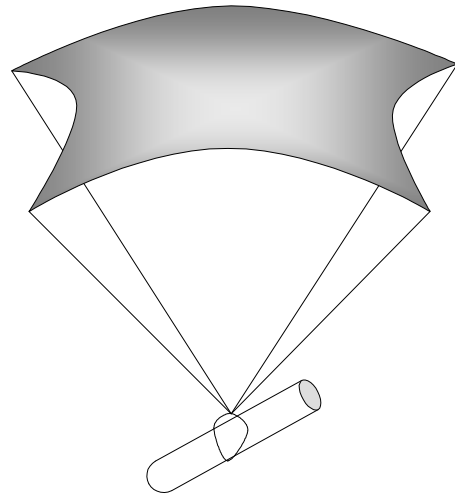
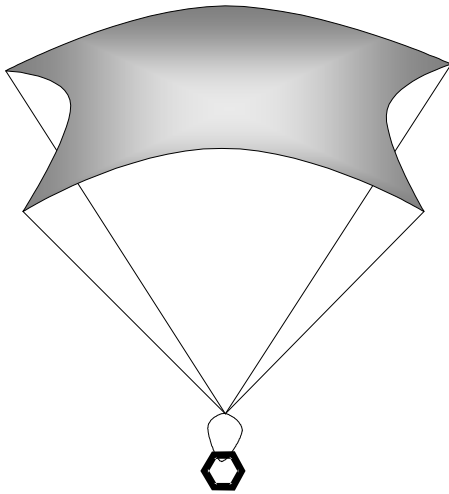
Serviette (dünn, einlagig, 30 × 30 cm) oder Kunststoffolie von Mülleimertüten (ca. 40 × 40 cm), ca. 1,50 m Nähgarn, Schere, Schraubenmutter (ca. 5 – 8 g), Reagenzglas

Durchführung

- a) Um jede Ecke der Serviette wird ein Faden (ca. 25 cm bzw. 30 cm) aus Nähgarn geknotet. Die Fäden werden in der Mitte durch die Mutter gezogen und so verknotet, dass der Knoten genau mittig ist.
- b) Anschließend wird die Schraubenmutter mit Hilfe einer Schlinge an den 4 verknoteten Fäden befestigt; die Schraubenmutter (Reagenzglas) wird entsprechend mittig befestigt.



- c) Die Serviette wird von einem Stuhl, einem Tisch oder einer Leiter so fallen gelassen, dass sie sich voll entfaltet.



- d) Eine Serviette wird zusammen mit der Schraubenmutter (Reagenzglas) zusammengeknäuel und fallen gelassen.

Beobachtung

Die zu einem Fallschirm geformte Serviette schwebt langsam zu Boden, während die zusammengeknäuelte Serviette mit der daran befestigten Mutter (Reagenzglas) schnell zu Boden fällt.

Erklärung

Vgl. Versuch 1

Versuch 5 (SV)

Aufbau

2 Blatt Papier (DIN A4), Stoppuhr

Durchführung

- Ein Blatt wird zu einem kleinen Knäuel zusammengedrückt und von einem Stuhl, einem Tisch oder einer Leiter fallengelassen; die Fallzeit wird gestoppt.
- Ein Blatt Papier wird von einem Stuhl, einem Tisch oder einer Leiter fallengelassen; die Fallzeit wird gestoppt.
- An Stelle von a) und b) können auch beide Blätter (Knäuel und Blatt) gleichzeitig fallengelassen werden.

Beobachtung

- Das Papierknäuel fällt schnell zu Boden.
- Das Blatt Papier gleitet langsam zu Boden.

Erklärung

- Das Papierknäuel hat auf Grund seiner geringen Fläche einen kleinen Luftwiderstand und fällt deswegen sehr schnell zu Boden.
- Das Blatt hat auf Grund seiner großen Fläche einen großen Luftwiderstand und gleitet daher langsam zu Boden.

Auch hier wird deutlich, dass die Form bzw. die Größe der Fläche des fallenden Körpers die Fallgeschwindigkeit bestimmen, da beide Blätter die gleiche Masse besitzen.
Ansonsten vgl. Versuch 1

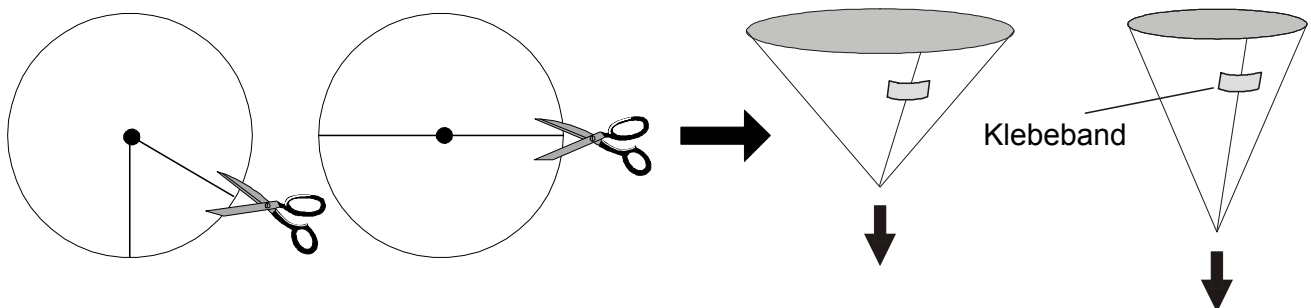
Versuch 6 (SV)

Aufbau

2 Blatt Papier (DIN A4), Schere, Zirkel, Geodreieck, Klebeband

Durchführung

- Mit dem Zirkel wird auf jedes Blatt ein Kreis mit Radius $r = 8\text{ cm}$ gezeichnet und ausgeschnitten.
- Auf die Kreisscheibe wird ein Mittelpunktswinkel von 60° bzw. 180° gezeichnet.
- Die Kreisscheiben werden vom Rand bis zum Mittelpunkt eingeschnitten.
- Anschließend werden die Schnittlinien entsprechend den Mittelpunktswinkeln übereinandergeschoben und jeweils mit einem Streifen Klebeband fixiert, so dass zwei Kegel mit verschiedenen Grundflächen, aber gleicher Masse entstehen.
- Beide Kegel werden von einem Stuhl, einem Tisch oder einer Leiter fallengelassen.



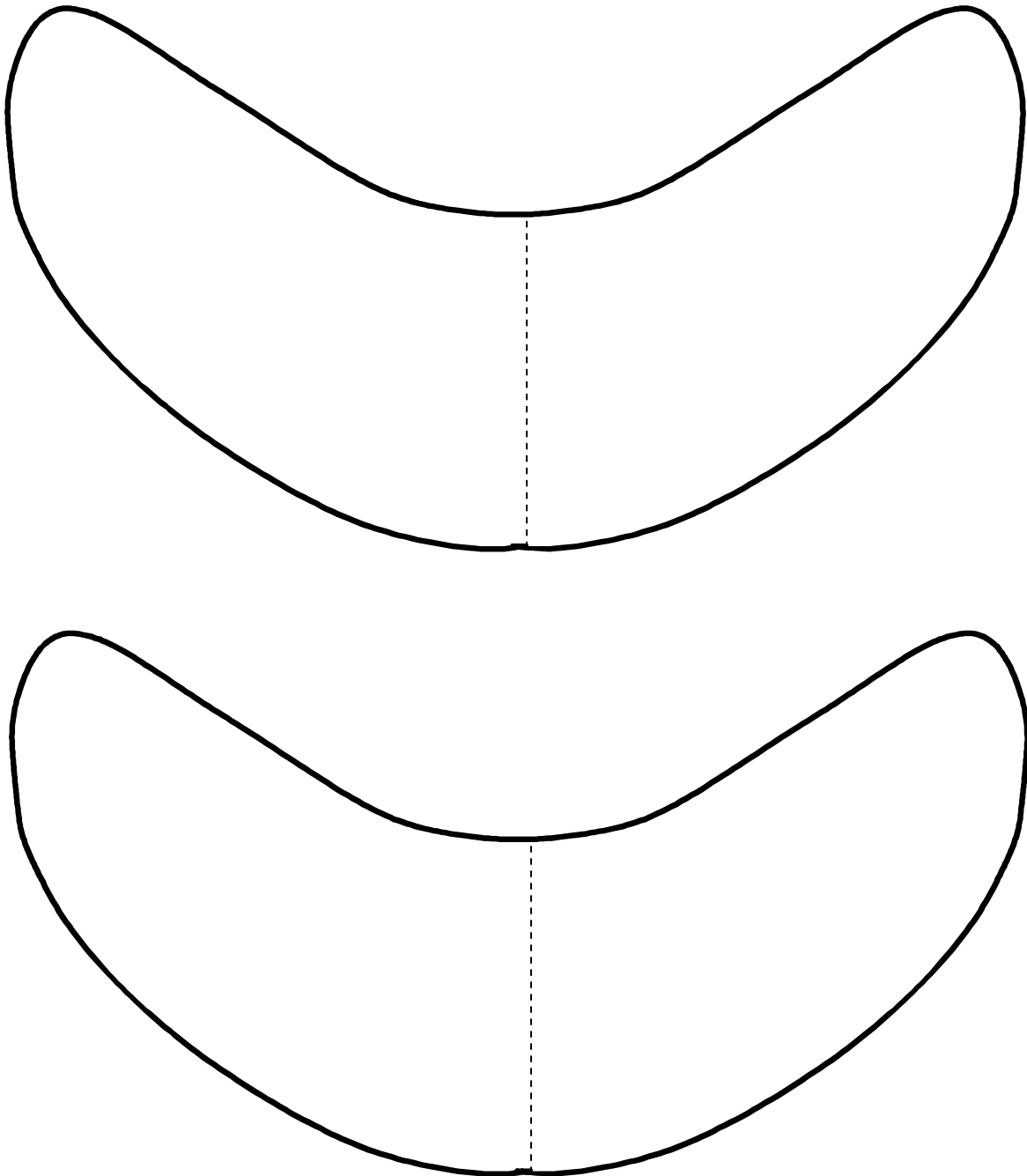
Beobachtung

Vgl. Versuch 5

Erklärung

Vgl. Versuch 1

Kopiervorlage für Zanonía-Modell



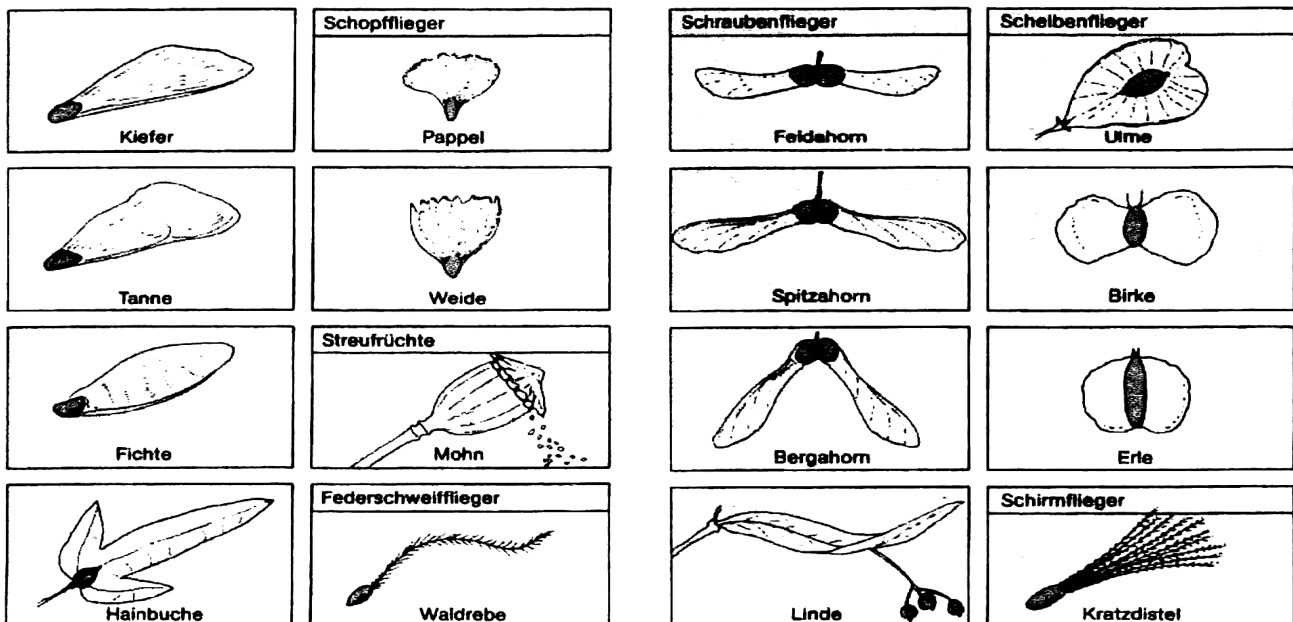
4. Luft trägt Körper

Wenn ein Körper in der Lufthülle der Erde fällt, dann wird seine **Fallgeschwindigkeit nicht nur durch sein Gewicht**, sondern auch durch den **Luftwiderstand** beeinflusst.

Der Luftwiderstand eines fallenden Körpers wird durch seine **Fläche** beeinflusst.

Je **größer die Fläche** des fallenden Körpers, **desto größer** sein **Luftwiderstand** und **desto geringer** seine **Fallgeschwindigkeit**.

Verschiedene Pflanzen nutzen dieses Prinzip, um ihre Samen in einem möglichst großen Umkreis zu verteilen. Sie haben deswegen eine **entsprechende Form**, die ihr **Gleiten** in der Luft unterstützt.



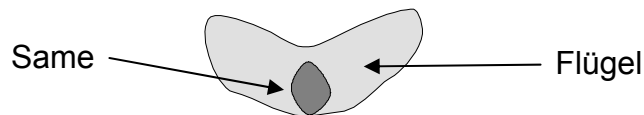
Der Mensch nutzt diese Eigenschaft beim **Fallschirm** aus. Wahrscheinlich war auch hier die **Natur das Vorbild**.



Bevor Fallschirmspringer ihren Schirm öffnen, gleiten sie häufig durch die Luft. Begründe, warum sie dabei versuchen, ihren Körper in waagerechter Position zu halten



In der Natur gibt es Samen, die sich mit Hilfe von Flügelbildungen durch die Luft bewegen. Der wahrscheinlich beste „Flieger“ ist der Samen der Zanonía-Pflanze. erkläre, warum dieser Same so gut fliegen kann.



Begründe, warum die Samen der Buche bzw. der Eiche sich nicht besonders weit durch die Luft fortbewegen können.



Eiche



Buche

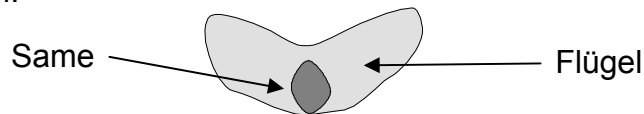
Lösungen zu Arbeitsblatt 4.2

Bevor Fallschirmspringer ihren Schirm öffnen, gleiten sie häufig durch die Luft. Begründe, warum sie dabei versuchen, ihren Körper in waagerechter Position zu halten



Wenn der Körper eine waagerechte Position einnimmt, dann ist sein Luftwiderstand am größten, weil die Fläche, die er der Luft entgegensetzt, am größten ist. Fallschirmspringer in dieser Position können sehr lange durch die Luft zu Boden gleiten.

In der Natur gibt es Samen, die sich mit Hilfe von Flügelbildungen durch die Luft bewegen. Der wahrscheinlich beste „Flieger“ ist der Samen der Zanonía-Pflanze. erkläre, warum dieser Samen so gut fliegen kann.



Der Same gleitet auf Grund seiner großen Flügelfläche langsam zu Boden und landet dadurch nicht direkt neben der Mutterpflanze. Bei Wind vergrößert sich die Entfernung. Wenn es zur Bildung einer neuen Pflanze kommt, kommt diese dadurch nicht in Konflikt mit der Mutterpflanze.

Begründe, warum die Samen der Buche bzw. der Eiche sich nicht besonders weit durch die Luft fortbewegen können.



Eiche



Buche

Die Samen von Eiche und Buche haben keine große Oberfläche, so dass ihre Geschwindigkeit, wenn sie fallen, so gut wie nicht verringert wird – sie haben also keinen großen Luftwiderstand. Da sie deshalb auch nicht durch die Luft gleiten können, fallen sie in der Nähe des Stammes der Mutterpflanze zu Boden.

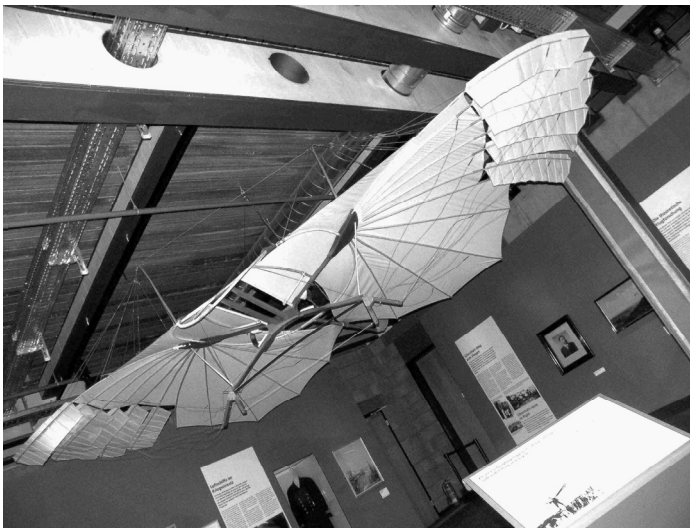
5. Vogelflug als Vorbild für Flugzeuge

Hinweis: Der Vogelflug ist eine sehr komplexe, dynamische Bewegung mit dem Zweck, gleichzeitig Auftrieb und Vortrieb zu erzeugen. Aus diesem Grund soll in diesem Kapitel nur vereinfacht und verkürzt auf diese Phänomene eingegangen werden.

Besonders hervorzuheben haben sich bei der Beobachtung und Auswertung des Vogelflugs die deutschen Flugpioniere Otto und Gustav Lilienthal. Durch Experimente gelang es ihnen, nachzuweisen, dass von allen denkbaren Flügelformen leicht gewölbte Flächen die besten aerodynamischen Eigenschaften beim Gleitflug besitzen.

Vogelflügel sind also Tragflächen, welche die gleichen Prinzipien der Aerodynamik beim Gleitflug verdeutlichen, wie die Flügel eines Flugzeugs. So sind die Flügel mancher Vögel wie z.B. Bussarde und Habichte an ein Segeln in Luftströmungen angepasst. Andere Vögel, darunter viele kleine und ganz besonders Kolibris, müssen ständig mit den Flügeln schlagen, um sich in der Luft halten zu können.

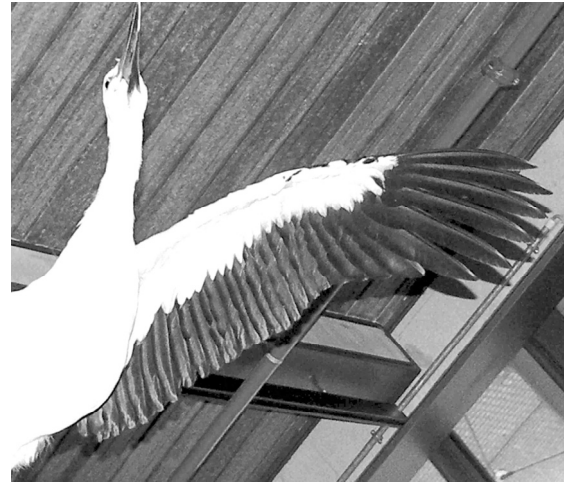
Auch Lilienthal kam – wie Leonardo – auf die Idee, den Gleitflug seiner Apparate durch Flügelschläge zu verlängern und konstruierte aus diesem Grund einen Schlagflügelapparat (Ornithopter), dessen Flügelspitzen wie die Schwungfedern eines Vogelflügels lamellenartig gefächert waren. Die Idee dazu kam ihm beim Studium des Flügelbaus und Schwingenfluges des Weißstorchs. Auch mit einem Einzylinder-Kohlensäuremotor – einen geeigneten Benzinmotor gab es noch nicht – kam es zu keinem erfolgreichen Versuch dieses Flugapparates. Heute wissen wir, dass zur Überwindung der Schwerkraft die Muskelkraft des Menschen viel zu gering ist. Erst Verbrennungsmotoren mit anderer Vortriebs-Technik lieferten die nötige Leistung und ließen den Traum vom Fliegen Wirklichkeit werden – allerdings in besonderen Flug-„Vehikeln“ ohne Flügelschlag.



Die nebenstehenden Fotos sind Ausstellungsobjekte aus dem Deutschen Technikmuseum Berlin.

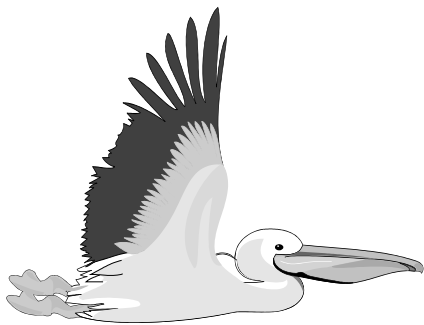
Es handelt sich dabei um einen Nachbau (von 1990) des Schlagflügelapparates von O. Lilienthal aus dem Jahr 1893.

Rechts unten ein Weißstorchpräparat mit den ausgestellten Handschwingen.

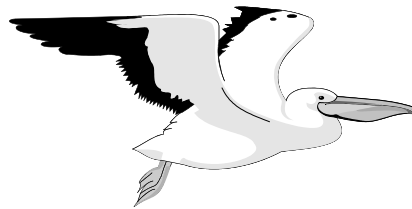


Im folgenden sollen hier die Vorgänge beim Vogelflug verkürzt und vereinfacht dargestellt werden.

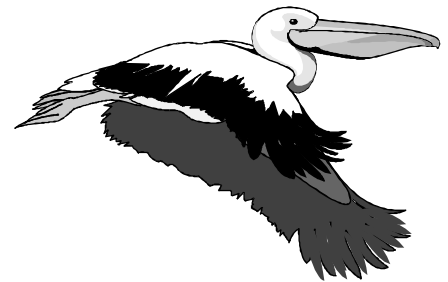
Die Flügelbewegung beim **Schlagflug (Ruderflug)** setzt sich zusammen aus **Aufschlag** und **Abschlag**. Bei den meisten Vögeln erzeugt der Aufschlag den Auftrieb, der unter anderem durch Anströmung der Flügeloberseite entsteht. Der Abschlag dagegen dient ausschließlich dem Vortrieb, d.h. der Vorwärtsbewegung.



Aufschlag

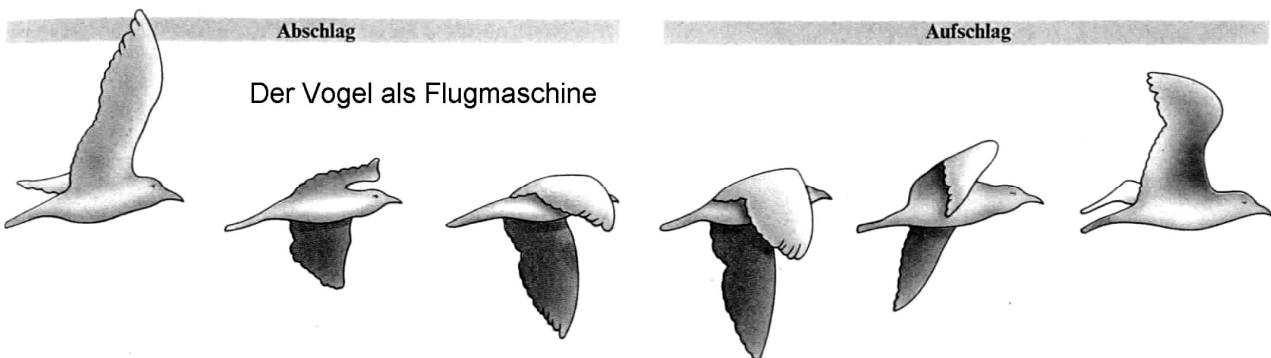


beginnender Abschlag



Abschlag

Hier auch noch einmal die wesentlichen Bewegungsvorgänge zwischen Abschlag und Aufschlag.



Um den Luftwiderstand und Kraftverbrauch möglichst gering zu halten, weichen deshalb beim Aufschlag die Handschwingen (Schwungfedern) etwas auseinander und die Federn am hinteren Flügelrand werden durchlässig gestellt; sie stehen also nicht fächerartig zusammen

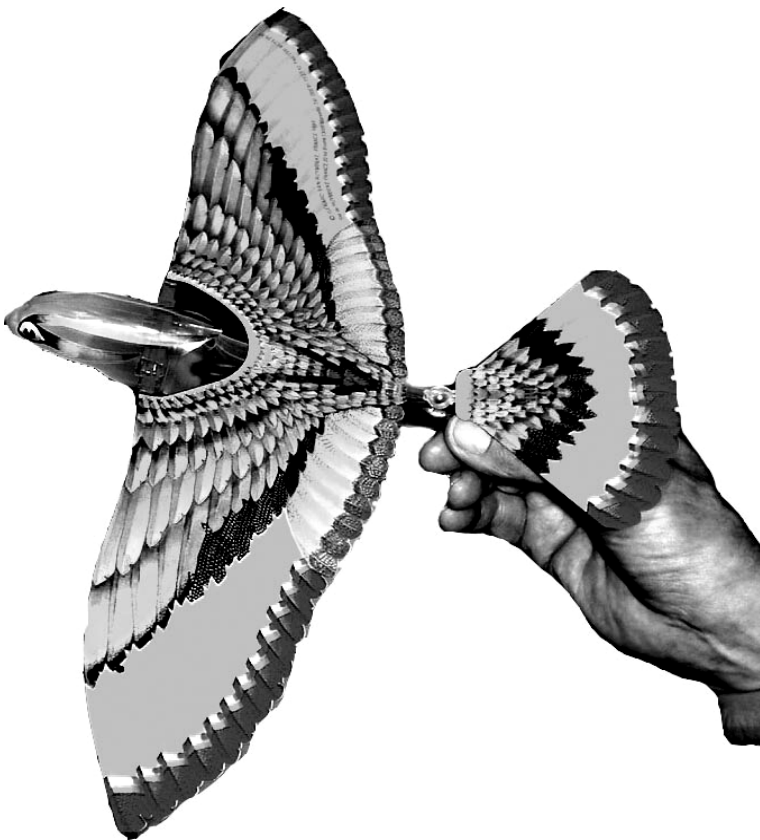
wie beim Abschlag (vgl. Bild Aufschlag). Manche Vögel knicken bzw. falten die Flügel darum auch beim Aufschlag ein bisschen ein (z.B. Taube und Möwe).

Zu Beginn des Aufschlags wird der Anstellwinkel vergrößert, was zu erhöhtem Auftrieb führt. Beim Vortrieb laufen mehrere Vorgänge ab: Der Flügel wird beim Schlagen geschwenkt. Er bewegt sich beim Aufschlag schräg nach hinten und zugleich nach oben, beim Abschlag schräg nach vorne und gleichzeitig nach unten. Zudem führt die Flügelspitze eine Wellenbewegung aus. Es findet also keine horizontale Flügelbewegung statt. Vögel ziehen sich also förmlich durch die Luft und vermögen das Flügelprofil an die sich ständig ändernden Strömungsverhältnisse anzupassen.

Hinweis: Ein Videofilm aus der Senderreihe „Quarks und Co.“ zum Thema „Fliegen“ geht unter anderem auf die Vorgänge beim Vogelflug ein.

Hinweis: Zur Veranschaulichung dieser Vorgänge in vereinfachter, anschaulicher Weise kann ein flugfähiges (Spielzeug-) Ornithopter-Modell, z.B. der „New Tim Bird“, ein mechanischer Vogel, System Leonardo da Vinci mit Flügelschlag durch Gummibandmotor dienen. Dieses Modell kann über das Internet unter www.miniprop.com für 16, 70 € inkl. Versandkosten bestellt werden. Das Modell kann in einem größeren Raum (Pausenhalle) oder besser noch bei wenig Wind im Freien vorgeführt werden und bietet Einblicke in die Zusammenhänge beim Vogelflug.

Auftrieb und Vortrieb werden bei diesem Vogelmodell unter anderem durch unterschiedliche Wölbung der Flügelflächen bewirkt.

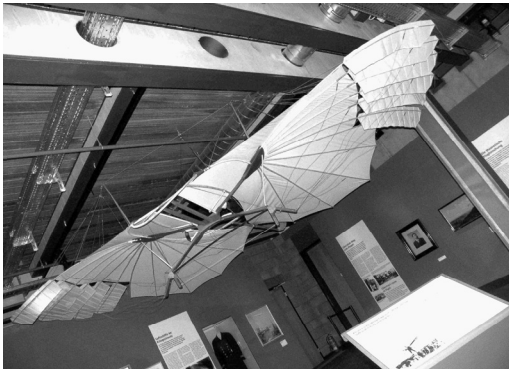


Hinweis: Um die Technik des Vogelzugs zu beobachten, sollten Vögel auf dem Schulhof bzw. in der Natur beobachtet werden.

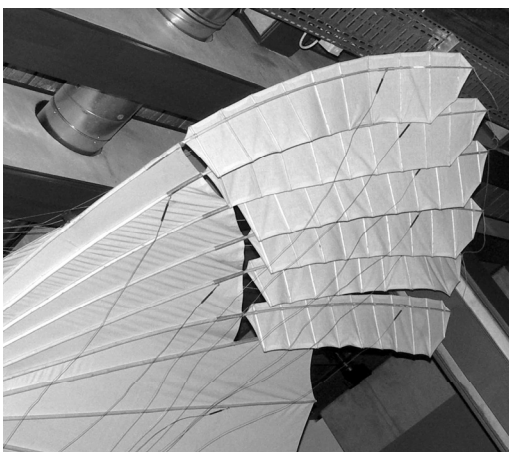
5. Vogelflug als Vorbild für Flugzeuge

Gegen ende des 19. Jahrhunderts versuchten der deutsche Flugpionier **Otto Lilienthal** und sein Bruder Gustav einen Schlagflügelapparat (Ornithopter) zu bauen. Sie wollten mit diesem Gerät die Gleitflugphase ihrer Flugapparate verlängern. Die Idee zu einem solchen Fluggerät hatte vor ca. 500 Jahren auch schon **Leonardo da Vinci**.

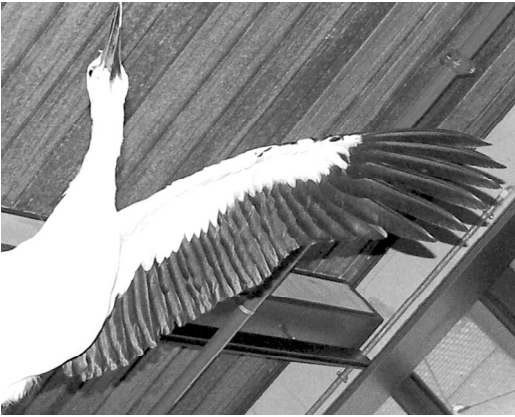
Heute weiß man, dass die Muskelkraft des Menschen nicht ausreicht, mit einem solchen Gerät die Schwerkraft zu überwinden – geeignete Benzinmotoren gab es damals noch nicht. Diese wurden erst am Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelt und von den **Brüdern Wright** bei ihren Flugversuchen verwendet. Bei der Konstruktion seines Schlagflügelapparates verwandte Lilienthal Erkenntnisse aus dem Studium des Flügelbaus und Schwingflugs des Weißstorchs.



Schlagflügelapparat (Ornithopter) der Brüder Otto und Gustav Lilienthal



Lamellenartig gefächerte Flügelspitzen des Schlagflügelapparates



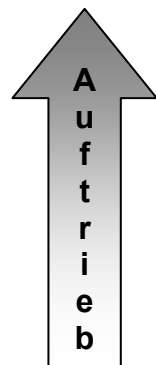
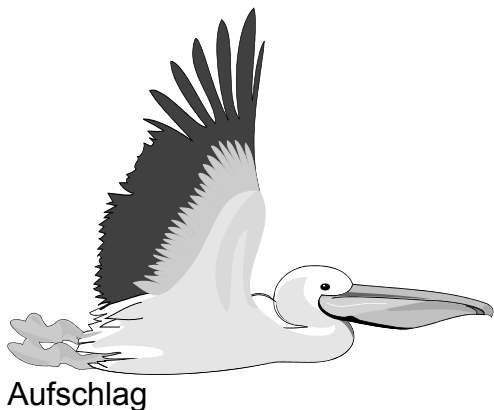
Weißstorch mit gefächerten Flügeln

Durch Experimente und Beobachtungen von Vögeln gelang es den Lilienthals nachzuweisen, dass von allen denkbaren Flügelformen **leicht gewölbte Flächen** die **besten aerodynamischen (strömungstechnischen) Eigenschaften** besitzen. **Tragflächen** von Flugzeugen werden nach diesem Prinzip gebaut.

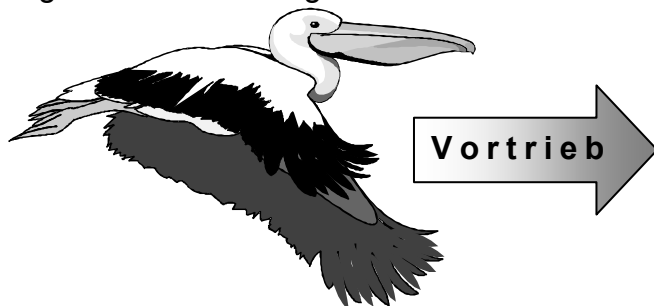
Bei den meisten Vögeln geschieht die Fortbewegung durch **Schlagflug** bzw. **Ruderflug**. Die Flügelbewegung beim Schlagflug setzt sich zusammen aus dem

- **Aufschlag**, bei dem sich der Flügel nach **oben** bewegt und den **Auftrieb**, d.h. eine nach oben gerichtete Kraft erzeugt
- **Abschlag**, bei dem der Flügel sich nach **unten** bewegt und den **Vortrieb**, d.h. eine nach vorn gerichtete Kraft erzeugt

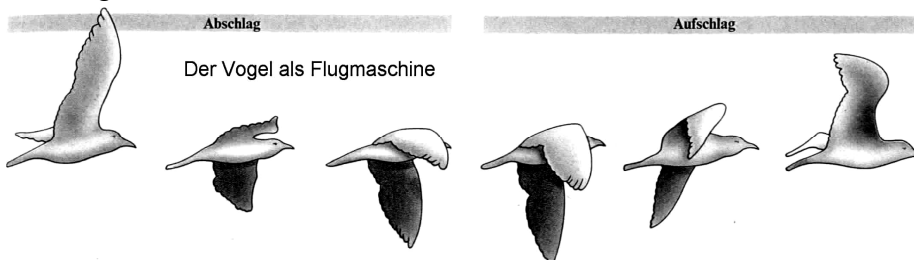
Bei diesen Bewegungsabläufen kann sich auch der Anstellwinkel des Flügels verändern.



Um den Luftwiderstand und Kraftverbrauch möglichst gering zu halten, weichen deshalb beim Aufschlag die Handschwingen (Schwungfedern) etwas auseinander und die Federn am hinteren Flügelrand werden durchlässig gestellt; sie stehen also nicht fächerartig geschlossen zusammen wie beim Abschlag (vgl. Bild Aufschlag). Manche Vögel knicken bzw. falten die Flügel darum auch beim Aufschlag ein bisschen ein (z.B. Taube und Möwe).



Abschlag



Erkläre, wie der Schlagflügler von Otto Lilienthal funktionieren sollte.

Warum konnte der Schlagflügler von Lilienthal sich nicht in die Luft erheben?

An welchem Vorbild hat sich Lilienthal bei der Konstruktion seines Schlagflüglers orientiert?

Warum hatten die Brüder Wright mit ihrem Flieger Erfolg?

Beschreibe kurz, welche Funktion Aufschlag und Abschlag für die Fortbewegung der meisten Vögel haben.

Begründe, warum ein Falke besser in der Luft gleiten kann als ein Kolibri.



Lösungen zu Arbeitsblatt 5.3

Erkläre, wie der Schlagflügler von Otto Lilienthal funktionieren sollte.

Der Schlagflügler war einem Vogel nachempfunden und seine Flügel sollten mit Hilfe der Muskelkraft der menschlichen Arme auf und ab bewegt werden.

Warum konnte der Schlagflügler von Lilienthal sich nicht in die Luft erheben?

Die menschliche Muskelkraft reicht nicht aus, um sich mit diesem Gerät in die Luft zu erheben.

An welchem Vorbild hat sich Lilienthal bei der Konstruktion seines Schlagflüglers orientiert?

Der Weißstorch war sein Vorbild bei der Konstruktion des Schlagflüglers.

Warum hatten die Brüder Wright mit ihrem Flieger Erfolg?

Die Brüder Wright verwendeten einen Benzinmotor, um den nötigen Vortrieb für einen Flug zu erhalten.

Beschreibe kurz, welche Funktion Aufschlag und Abschlag für die Fortbewegung der meisten Vögel haben.

Beim Aufschlag wird Auftrieb, d.h. eine nach oben wirkende Kraft, während beim Abschlag Vortrieb, d.h. eine nach vorne wirkende Kraft erzeugt wird.

Begründe, warum ein Falke besser in der Luft gleiten kann als ein Kolibri.



Die Tragflächen des Falken haben eine große Fläche, wodurch er von der Luft getragen wird und zum anderen auf Grund seines Gleitens Auftrieb erzeugt. Der Kolibri hat sehr kleine Flügel, deren Fläche zum Gleiten daher nicht geeignet sind. Er muss deshalb durch schnelles Flügelschlagen ständig für Auftrieb und Vortrieb erzeugen.

6. Auftrieb bei bewegter Luftströmung

Hinweis: Die Schüler werden nach weiteren Flugkörpern gefragt; dabei werden sicherlich Flugzeuge genannt. Wie kommt es nun, dass Flugzeuge fliegen, die ja keinen Auftrieb – jedenfalls keinen mit Ballons vergleichbaren Auftrieb – besitzen?

Hinweis: Bei den folgenden Versuchen wird ein Föhn mit kräftigem Gebläse benötigt; die Heizleistung ist sekundär. Sollten diese als Schülerversuche durchgeführt werden, müssten die Schüler einen solchen Föhn zum Unterricht mitbringen bzw. es müssten Föhne angeschafft werden (vgl. Anhang). Wird die Luftansaug-Abdeckung, die hinten sitzt, entfernt, dann kann die Blasleistung des Föhns um ca. 20 % gesteigert werden.

Versuch 1 (SV)

Aufbau

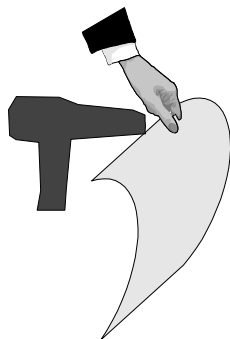
Blatt Papier (DIN A4), Föhn

Durchführung

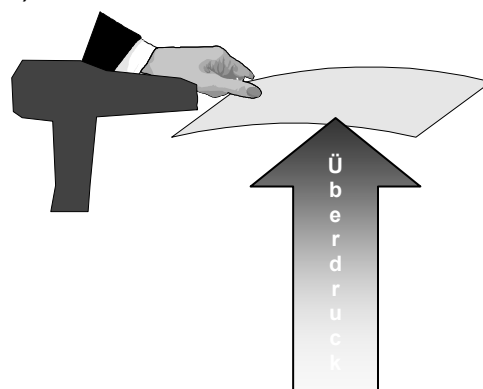
- a) Das Blatt Papier wird in der Hand gehalten.
- b) An das herunterhängende Blatt wird ein Föhn waagerecht gehalten und eingeschaltet. Dieser Vorgang kann mehrfach wiederholt werden.

Beobachtung

a)



b)



Beobachtung

Geht der Luftstrom des Föhns über die gekrümmte Kante des nach unten hängende Blattes hinweg, dann flattert das Blatt waagrecht in der Luft vom Luft. Schaltet man den Föhn aus, dann hängt das Blatt wieder herunter.

Erklärung

Durch den waagerechten Luftstrom hat sich nach dem Gesetz von Bernoulli über dem Blatt ein Unterdruck gebildet (der statische Druck hat sich verringert), so dass die Luft unter dem Blatt, dieses nach oben drückt.

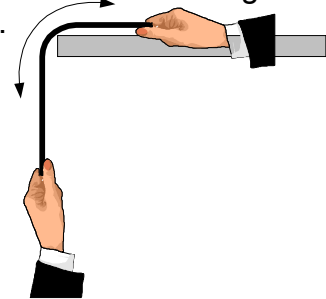
Versuch 2 (SV)

Aufbau

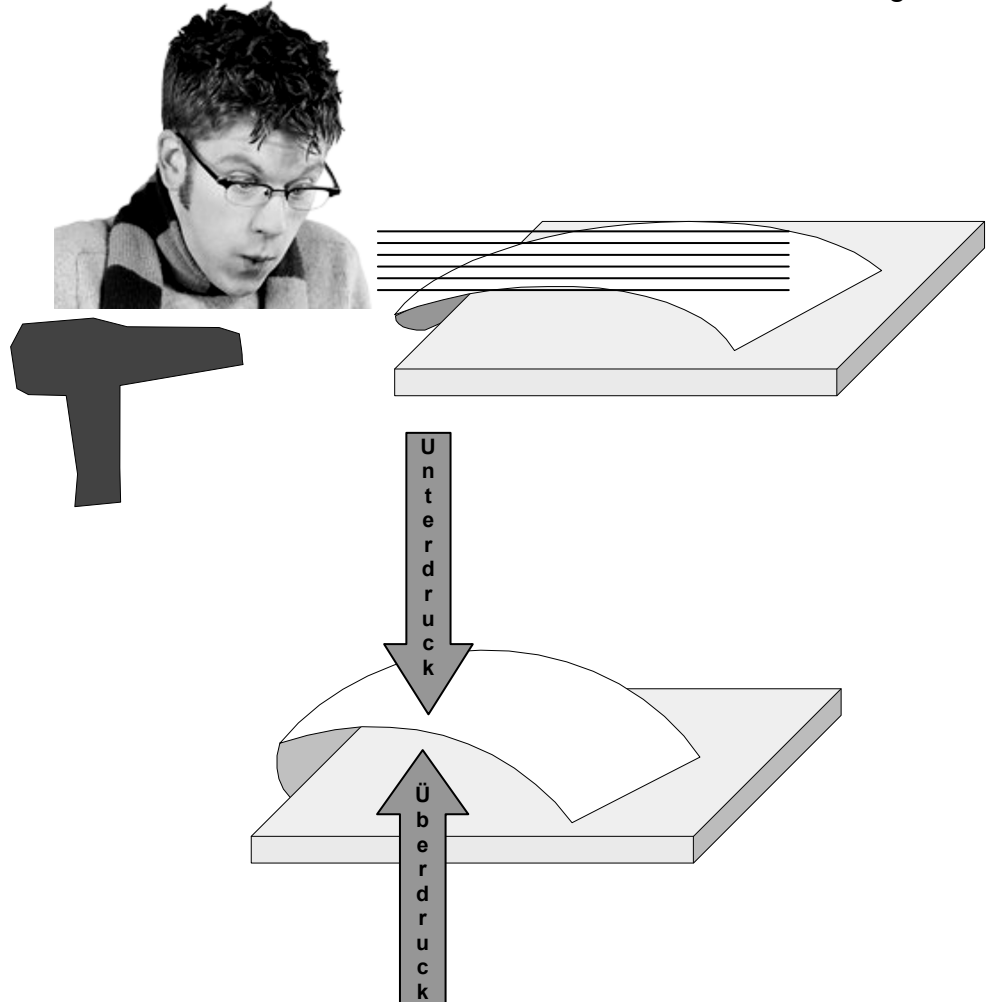
Blatt Papier (DIN A4), evtl. Föhn, Lineal

Durchführung

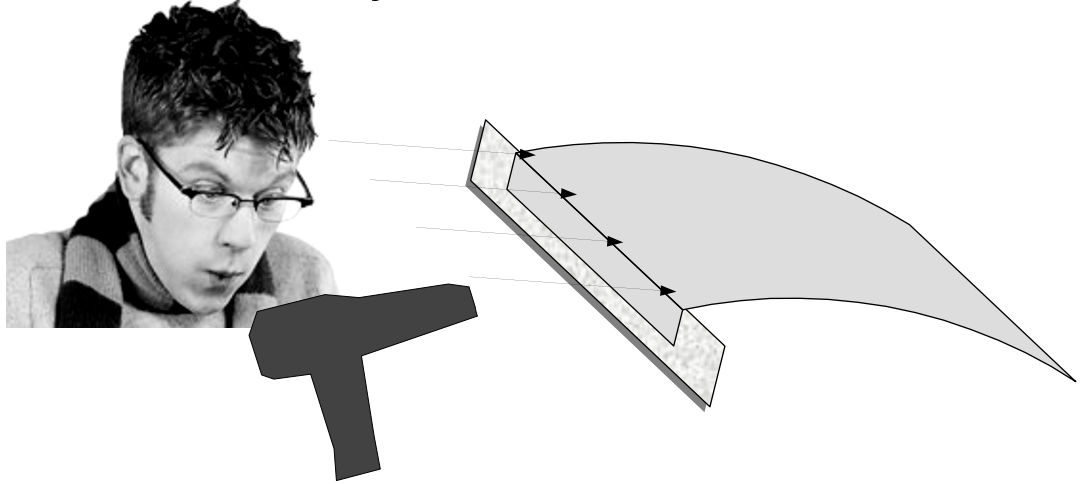
- a) Das Blatt Papier wird über die Tischkante gezogen, so dass es anschließend gewölbt ist (es ist darauf zu achten, dass die Wölbung nicht zu stark ist).



- b) Das Blatt Papier wird auf den Tisch gelegt und an der Tischkante mit der Hand fixiert. Dann wird waagerecht darüber geblasen bzw. der Luftstrom eines Föhn wird waagerecht darüber geleitet.



- c) Das Blatt Papier wird rechtwinklig über ein Lineal geknickt und so gehalten, dass es über das Lineal hängt. Anschließend wird der Luftstrom des Föhns waagerecht darüber geleitet bzw. es wird waagerecht darüber geblasen.



Beobachtung

Das Blatt bewegt sich bzw. wölbt sich bei jedem der Versuche nach oben.

Erklärung

Durch den waagerechten Luftstrom hat sich nach dem Gesetz von Bernoulli über dem Blatt ein Unterdruck und unter dem Blatt ein Überdruck gebildet. Auf Grund dieser Vorgänge bewegt sich das Blatt – entgegen der allgemeinen Vorstellung, wonach die strömende Luft das Blatt nach unten drücken müsste – nach oben. Vgl. dazu auch Sachinformationen S. 4.

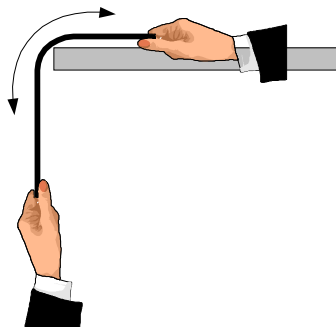
Versuch 3 (SV)

Aufbau

2 Blatt Papier (DIN A4), evtl. Föhn

Durchführung

- a) Die beiden Blätter werden mehrfach über die Tischkante gezogen, so dass sie gewölbt sind.



- b) Beide Blätter werden parallel in einem Abstand von 5 – 10 cm nebeneinander gehalten und in den Zwischenraum wird geblasen bzw. der Luftstrom eines Föhns benutzt.



Beobachtung

Durch den Luftstrom bewegen sich die Blätter aufeinander zu und berühren sich.

Erklärung

Die beiden Blätter werden nicht – wie vielleicht angenommen – auseinander getrieben, sondern bewegen sich aufeinander zu und berühren sich.

Durch den Luftstrom wurde zwischen beiden Blättern ein Unterdruck erzeugt, so dass der normale Luftdruck auf die Außenseiten einwirken konnte und die Blätter zusammengedrückt hat. Ansonsten vgl. Versuch 1.

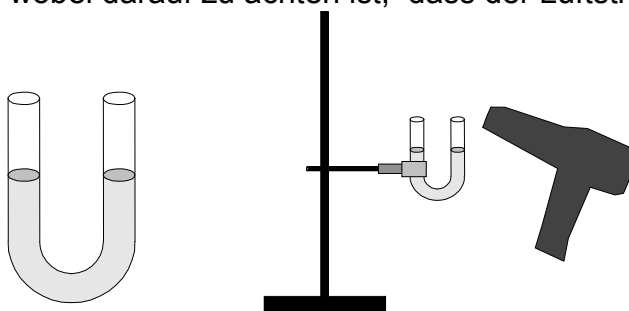
Versuch 4 (SV)

Aufbau

U-Rohr ($\varnothing$ nicht viel größer als 1,5 cm), Föhn, Stativ, Stativklemme, Doppelmuffe

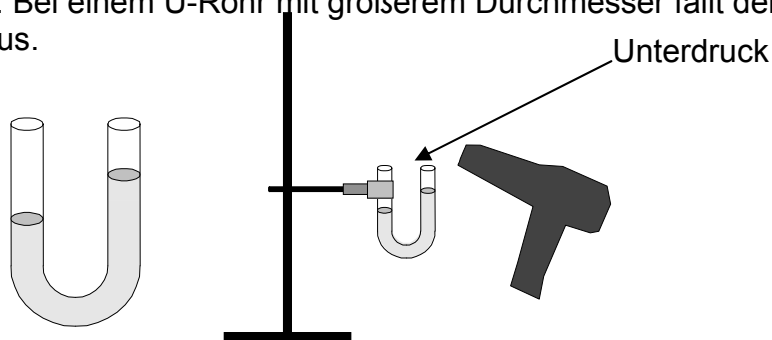
Durchführung

Der Luftstrom des Föhns strömt etwas schräge von unten über die Öffnung des mit Wasser gefüllten U-Rohrs, wobei darauf zu achten ist, dass der Luftstrom nur über eine Öffnung strömt.



Beobachtung

Die Wassersäule im U-Rohr steigt auf der Seite, wo der Luftstrom über die Öffnung strömt, um ca. 1 – 2 cm an. Bei einem U-Rohr mit größerem Durchmesser fällt der Anstieg der Wassersäule geringer aus.



Erklärung

Dadurch, dass die Luft schnell über die Mündung des U-Rohrs hinwegströmt, sinkt der statische Druck unterhalb der Mündung, d.h. es entsteht dort ein Unterdruck. Dies bewirkt, dass der normale Luftdruck das Wasser über den Gleichstand hinaus in den anderen Schenkel drücken kann.

Hinweis: Als Waagen für die folgenden Versuche, wenn sie als Schülerversuch durchgeführt werden, sind Digitalwaagen (1000 g $d = 1$ g) gut geeignet, während sich für Demonstrationsversuche Tafelwaagen anbieten. Sollten bei den Versuchen Briefwaagen verwendet werden, ist darauf zu achten, dass der Luftstrom des Föhns nicht unter die Auflagefläche der Waage bläst, da ansonsten die Ergebnisse verfälscht werden könnten.

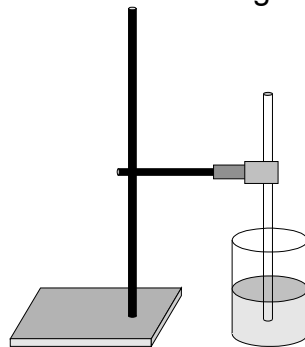
Versuch 5 (SV)

Aufbau

Föhn, Becherglas, Glasrohr ($\varnothing$ 5 mm oder mehr), Stativ, Stativklemme, Doppelmuffe

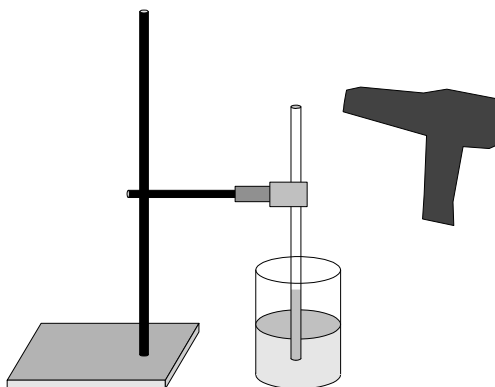
Durchführung

- Das Glasrohr wird so fixiert, dass es in das Becherglas eintaucht.
- Der Luftstrom des Föhns strömt über die Mündung des Glasrohrs.



Beobachtung

Das Wasser steigt ca. 2 – 3 cm im Glasrohr hoch.



Erklärung

Vgl. Versuch 4.

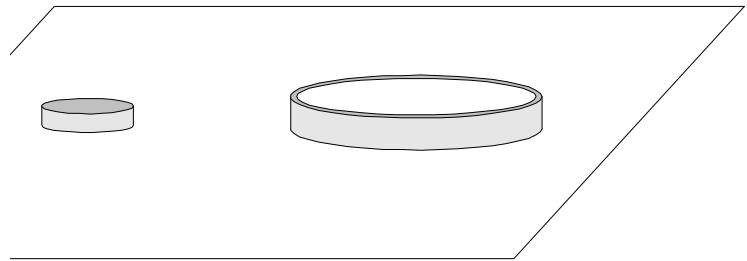
Versuch 6 (SV/LV)

Aufbau

Münze (2 Cent-Stück), flache Schale evtl. Petrischale

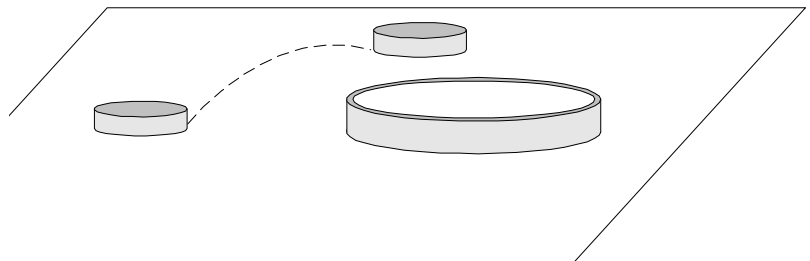
Durchführung

- Die Münze wird auf einen Tisch gelegt (ca. 10 cm entfernt von der Tischkante).
- Eine flache Schale wird ca. 15 – 20 cm Entfernung vor die Münze gestellt.
- Es wird sehr kräftig über die Münze geblasen



Beobachtung

Die Münze fliegt in die Schale (wahrscheinlich erst nach mehreren Versuchen).



Erklärung

Auf Grund des schnellbewegten Luftstroms entsteht über der Münze ein Unterdruck, so dass sie durch den größeren Luftdruck in ihrer Umgebung angehoben wird.

Versuch 7 (SV/LV)

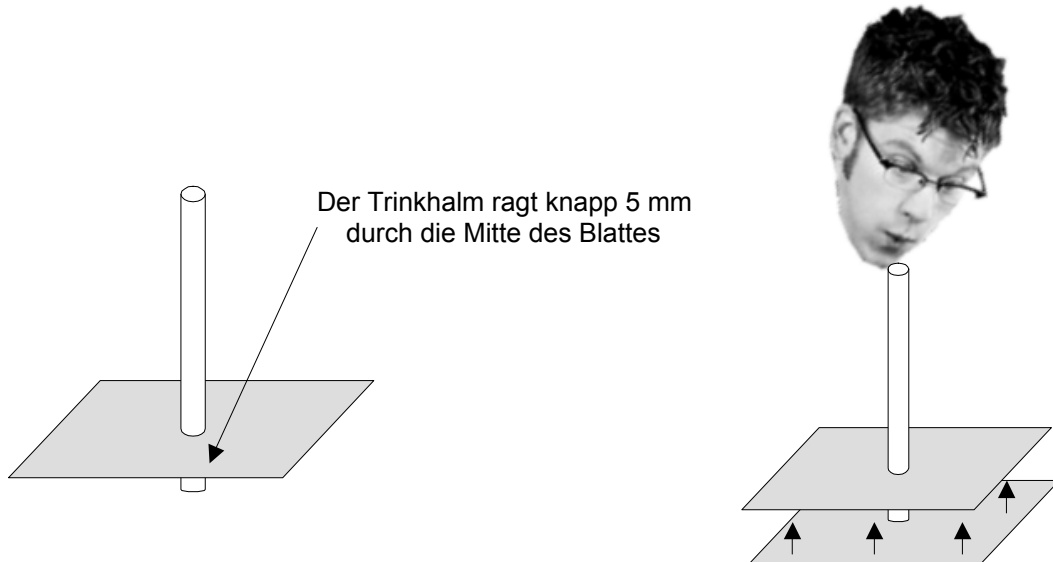
Aufbau

Trinkhalm aus Kunststoff, 1 Blatt Papier (DIN A4), Lineal oder Schere, Kugelschreiber, evtl. Klebeband

Durchführung

- Das Blatt Papier wird halbiert.
- In die Mitte des einen Blattes wird mit der Kugelschreiberspitze ein Loch gestochen, dessen Durchmesser kleiner ist als der Durchmesser des Trinkhalms.
- Durch dieses Loch wird der Trinkhalm geschoben, so dass er knapp 5 mm auf der Rückseite des Blattes herausragt.
- Sollte der Trinkhalm sehr locker in dem Loch sitzen, kann er mit zwei kleinen Streifen Klebeband fixiert werden.

- e) Das Blatt mit dem Trinkhalm wird mittig über das andere Blatt, das auf einer nicht zu glatten Unterlage (Adhäsion) liegen sollte, gelegt.
- f) Es wird sehr kräftig in den Trinkhalm geblasen, wobei er gleichzeitig mit dem Blatt nach oben gezogen wird.



Beobachtung

Das unten liegende Blatt haftet an dem oberen und kann in die Höhe gezogen werden.

Erklärung

Dadurch, dass die Luft, wenn sie aus dem Trinkhalm strömt, nur in den engen Raum zwischen den zwei Blättern strömen kann, erhöht sich ihre Geschwindigkeit, da im gleichen Zeitraum die gleiche Menge Luft durch den Zwischenraum strömen muss. Nach Bernoulli sinkt der statische Druck zwischen den beiden Blättern und das untere Blatt wird durch den äußeren Luftdruck an das oben liegende angepresst. Man bezeichnet diesen Effekt als *aerodynamisches Paradoxon*. Wird dieser Versuch mit Flüssigkeiten und zwei Platten durchgeführt, spricht man vom *hydrostatischen Paradoxon*, da man normalerweise vermutet, dass die beiden Platten auseinander driften und nicht zusammengedrückt werden.

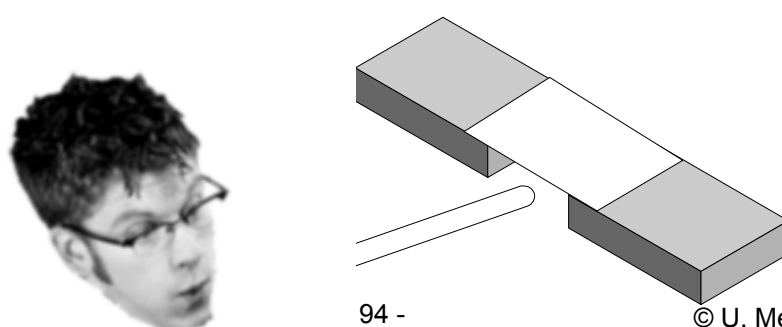
Versuch 8 (SV/LV)

Aufbau

Trinkhalm aus Kunststoff, Blatt Papier (DIN A4), 2 Bücher, die jeweils ca. 5 cm hoch sind bzw. mehrere dünne Bücher (es können auch entsprechende Holzbretter oder andere Gegenstände verwendet werden), die entsprechend übereinandergelegt diese Höhe erreichen.

Durchführung

- a) Die Bücher werden in einem Abstand von ca. 10 cm nebeneinandergelegt.
- b) Über den Zwischenraum wird mittig das Blatt Papier gelegt.
- c) Mit dem Trir eiden Bücher geblasen.



Beobachtung

Das Blatt Papier wird in den Zwischenraum gezogen.

Erklärung

Auf Grund der schnellen Luftströmung entsteht im Zwischenraum ein Unterdruck, so dass die äußere Luft, deren Druck ja höher ist, von oben auf das Blatt drückt.

Versuch 9 (SV/LV)

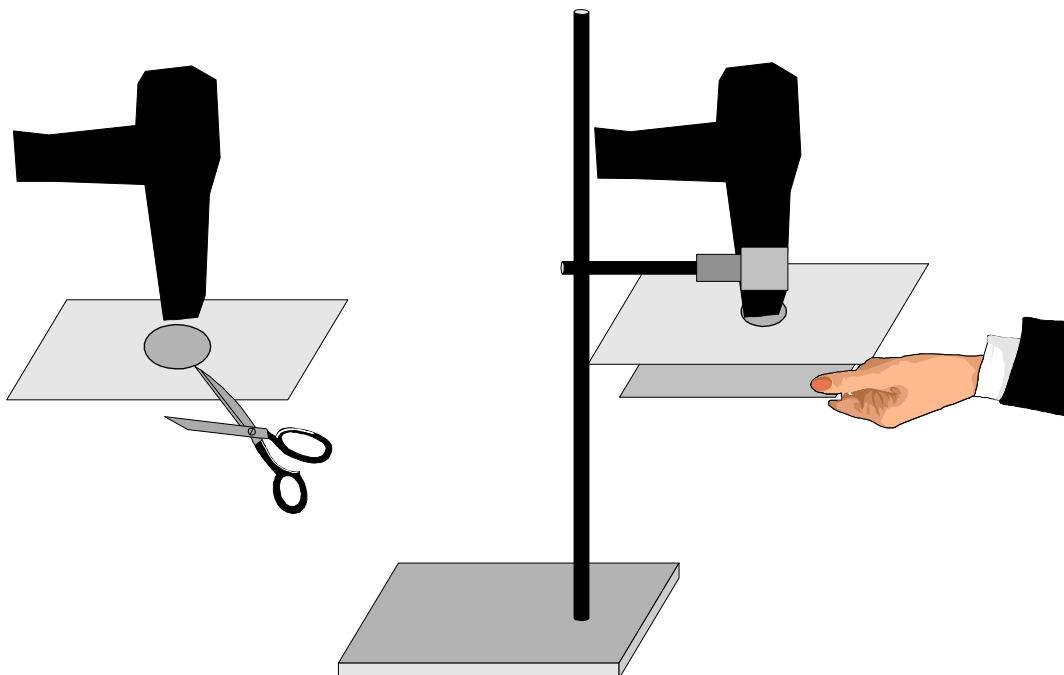
Aufbau

Föhn, Stativ, Stativmuffe, Stativklemme, Schere, ein Quadrat (ca. 20 cm × 20 cm oder auch größer) aus fester, glatter Pappe, Blätter bzw. Platten aus Papier, Pappkarton, Styropor (1 – 2 cm dick), Zeichenkarton, evtl. aus sehr dünnem Kunststoff (alle ca. 20 cm × 20 cm oder auch größer),

Durchführung

- d) Bei dem Quadrat aus fester Pappe wird in der Mitte ein Loch ausgeschnitten, so dass die Mündung des Föhns gerade hineingedrückt werden kann (die Pappe muss nach Möglichkeit sehr plan sein).
- e) Der Föhn wird mit Hilfe der Stativklemme fixiert, so dass seine Mündung senkrecht nach unten zeigt.
- f) Die Mündung des Föhns wird ca. 2 – 3 mm durch das Loch in der Pappe gepresst. Sollte das Loch zu groß geraten sein, kann die Mündung des Föhns mit Kreppband umwickelt werden, so dass ein straffer Sitz gewährleistet ist.
- g) Der Föhn wird auf höchste Stufe gestellt und von unten wird ein Blatt Papier der Mündung genähert.
- h) Das Gleiche wird anschließend mit den Platten aus den anderen Materialien gemacht.

Eventuell muss die Mündung des Föhns bzw. das Pappquadrat mehrfach justiert werden.



Beobachtung

Die Platten werden, wenn sie dicht genug an die Mündung gehalten werden, von dem Luftstrom des Föhns angezogen und bleiben ohne Unterstützung haften (dies klappt oft erst nach mehreren Versuchen).

Erklärung

Vgl. Versuch 7.

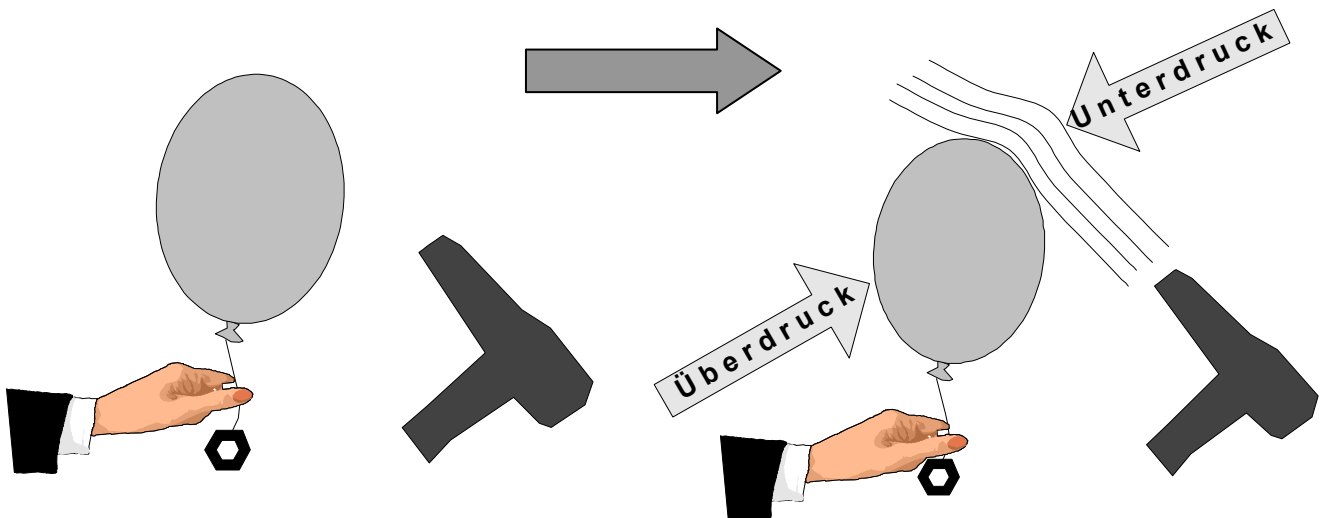
Versuch 10 (SV/LV)

Aufbau

Föhn, Luftballon, Gegenstand von ca. 10 g Masse (großer Nagel, Schraubenmutter oder Ähnliches), 15 – 20 cm Bindfaden

Durchführung

- i) Der Ballon wird prall aufgeblasen und zugeknotet.
- j) Das eine freie Ende des Bindfadens wird mit dem Gegenstand verknotet.
- k) Das andere Ende des Bindfadens wird um den Ballonknoten geknotet.
- l) Der Ballon wird mit der Hand am Knoten gehalten und mit der stärksten Stufe des Föhns schräge von unten angeblasen und dann etwas später losgelassen.
- m)



Beobachtung

Der Ballon mit dem Massestück schwebt nach anfänglichem Halten ohne Unterstützung in der Luft. Bei entsprechender Position des Föhns nähert er sich diesem bis auf eine geringe Distanz; es scheint als würde er „angezogen“.

Erklärung

Der Ballon wird nicht – wie vielleicht erwartet – von dem Luftstrom weggeblasen, sondern von ihm gehalten bzw. „angezogen“. Der Grund dafür liegt darin, dass sich nach dem Gesetz von Bernoulli die Luft entlang des Ballons schnell bewegt, sich dort eine Strömung bildet, so dass ein Unterdruck entsteht. Durch die Wölbung der Ballonoberfläche, an die sich die Luftströmung des Föhns besonders gut anschmiegt (Coanda-Effekt), wird diese Strömung noch

weiter beschleunigt und verstärkt somit den Unterdruck. Da auf der nichtangeströmten Seite der normale Luftdruck auf den Ballon einwirkt, trägt dieser den Ballon.

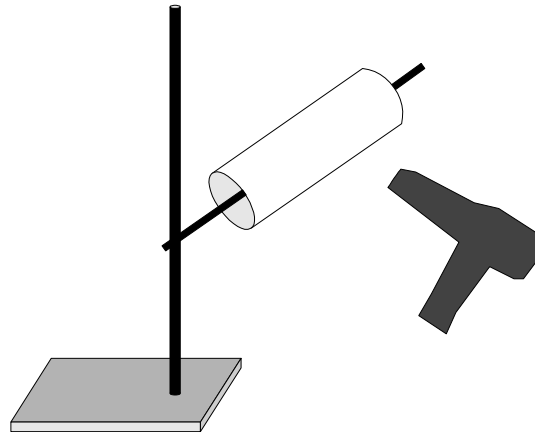
Versuch 11 (SV/LV)

Aufbau

Föhn, Stativ, Stativklemmen, kurze Stativstange (ca. 50 cm), Doppelmuffe, Blatt Papier (DIN A4), Klebeband

Durchführung

- a) Das Blatt Papier wird längs zu einer Röhre geformt und mit 3 Stück Klebeband fixiert.
- b) Die kurze Stativstange wird an dem Stativ waagrecht mit der Doppelmuffe befestigt.
- c) Das Papierrohr wird über die Stange geschoben.
- d) Der Luftstrom des Föhns wird aus ca. 30 – 50 cm Entfernung über das Papierrohr geleitet.



Beobachtung

Das Papierrohr bewegt sich nach oben.

Erklärung

Vgl. Erklärung von Versuch 10.

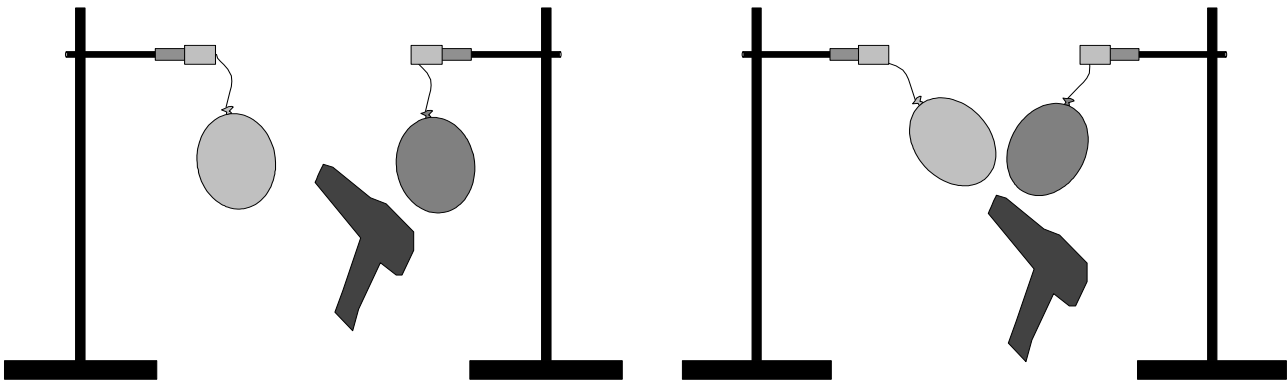
Versuch 12 (SV/LV)

Aufbau

Föhn, 2 Stative, 2 Stativklemmen, 2 Doppelmuffen, 2 Luftballons, ca. 40 cm Bindfaden

Durchführung

- a) Die beiden Stative mit den Stativklemmen werden aufgebaut und es werden an einem ca. 20 cm langen Faden beide Luftballons an jeweils einem Stativ befestigt. Der Abstand zwischen den Ballons kann ca. 20 – 40 cm betragen.
- b) Der Luftstrom des Föhns wird zwischen die beiden Ballons gerichtet. Eventuell kann der Versuch auch mit kräftigem Pusten durchgeführt werden.



Beobachtung

Sobald ein Luft zwischen den Ballons strömt, bewegen sie sich aufeinander zu und berühren sich.

Erklärung

Die Ballons werden auch hier nicht, wie vielleicht erwartet, von dem Luftstrom auseinander getrieben, sondern nähern sich so weit bis sie sich berühren bzw. fast berühren. Auf Grund der Luftströmung wird zwischen den beiden Ballons ein Unterdruck erzeugt, so dass die Luft von beiden Seiten, da deren Druck ja höher ist, gegen die Ballons drückt, so dass sie zusammenkommen.

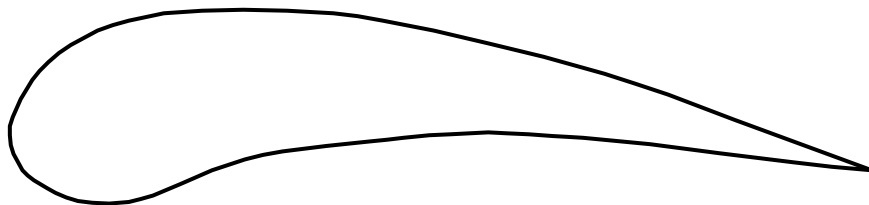
Versuch 13 (SV/LV)

Aufbau

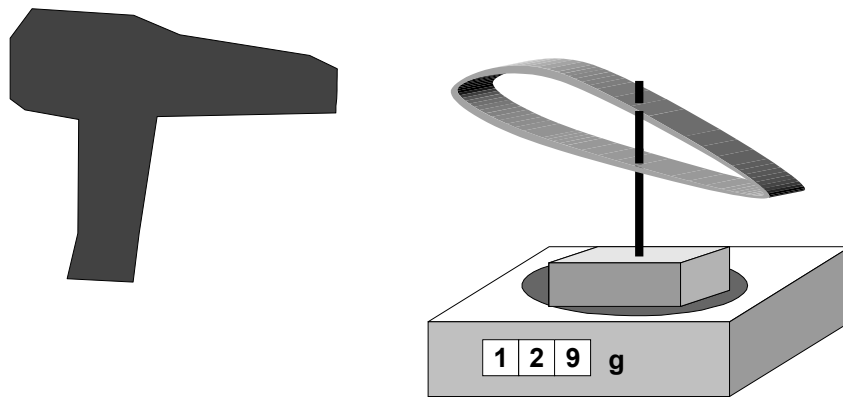
Waage, Föhn mit aufsteckbarer Düse (zur Erhöhung der Luftgeschwindigkeit), Streifen aus Zeichenkarton, Nagel (eckiges Profil), ca. 10 cm lang, Holzplatte bzw. Spanplatte (ca. 7 cm × 7 cm × 1 cm oder ähnlich), Föhn, Hammer, Kleber (Pattex, Uhu oder andere) oder Tesafilm

Durchführung

- a) Der Nagel wird vollständig durch die Mitte des Holzbrettchens getrieben
- b) Aus Zeichenkarton wird ein ca. 30 cm langer und 4 cm breiter Streifen geschnitten und an den Enden zusammengeklebt (entweder mit Kleber oder mit einigen Streifen Tesafilm).
- c) Wenn die Enden fest zusammenkleben, wird annähernd das folgende Profil geformt:



- d) Dieses Profil wird auf dem Brettchen mit dem Nagel fixiert.
- e) Das Brettchen mit dem Profilstreifen wird auf die Waage gestellt und es wird das Gewicht notiert.
- f) Das Profil wird möglichst parallel mit dem stärksten Luftstrom des Föhns angeblasen (evtl. Brettchen mit Klebeband oder Hafties fixieren, damit es durch den Luftstrom nicht bewegt wird).



Beobachtung

Beim Anblasen des Profils zeigt die Waage ein um einige Gramm geringeres Gewicht an.

Erklärung

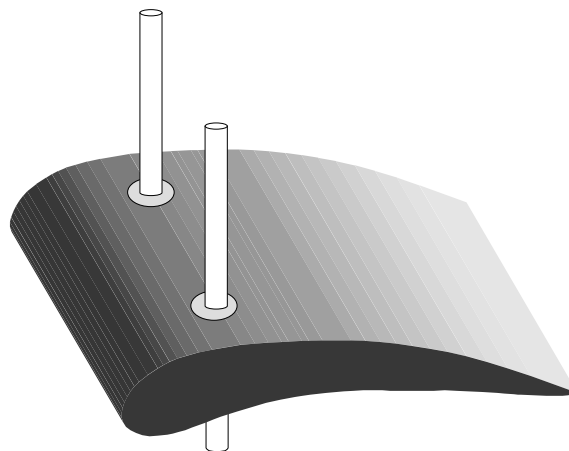
Durch den waagerechten Luftstrom hat sich nach dem Gesetz von Bernoulli über dem Profil ein Unterdruck und unter dem Profil ein Überdruck gebildet. Auf Grund dieses Sachverhaltes hat das Profil mit dem Holzbrettchen einen Auftrieb erhalten, wodurch seine Gewichtskraft nicht mehr voll auf die Waage drückt.

Versuch 14 (LV/SV)

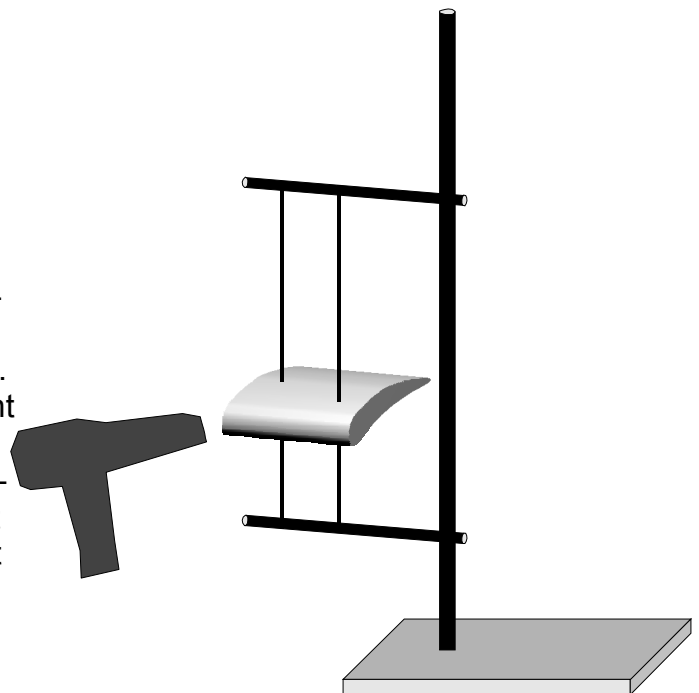
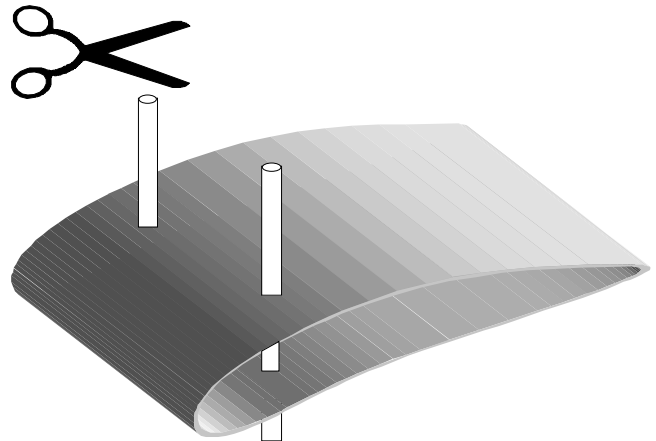
Aufbau

Föhn mit aufsteckbarer Düse, Profilkörper aus Styropor, aus Zeichenkarton (ca. 12×35 cm) oder Blatt Papier (ca. 15×30 cm), ca. 1,5 m Konstantan- oder Kupferdraht ($\varnothing 0,3$ mm), Stativ, 2 Doppelmuffen, 2 Stativstangen ca. 30 cm, Trinkhalm aus Kunststoff, Schere, Tesafilm, Kleber (geeignet für Styropor), Seitenschneider, evtl. Silikonöl

Durchführung



- a) Durch das Styroporprofil werden zwei senkrecht verlaufende Löcher mit einem Schraubenzieher durchgestoßen.
 - b) In die Löcher wird etwas Kleber hineingedrückt.
 - c) Zwei Trinkhalmabschnitte werden so durch die Löcher geschoben, dass sie etwas überstehen und nach Trocknung des Klebers bündig mit einer Schere abgeschnitten werden.
 - d) Bei dem Profil aus Zeichenkarton oder Papier muss darauf geachtet werden, dass beim Durchstechen die Löcher genau senkrecht untereinander sind. Danach werden die Trinkhalmabschnitte durchgeschoben und verklebt. So lange der Kleber noch nicht trocken ist, muss das Profil wieder in Form gebracht werden. Nach Trocknung des Klebers Trinkhalmabschnitte bündig abschneiden.*
 - e) Zwei Stativstangen werden mit Hilfe von Doppelmuffen im Abstand von ca. 50 cm an einem Stativ befestigt.
 - f) Die beiden Drähte werden im Abstand der Löcher im Profil mit dem einen Ende an der unteren Stativstange fest verdreht. Die beiden anderen Drahtenden werden durch die Löcher geschoben und an der oberen Stativstange so befestigt, dass sie sehr stramm gespannt sind und parallel verlaufen. Evtl. Drähte nachspannen.
 - h) Das Profil wird mit dem Föhn angeblasen.
 - i) Um die Gleitfähigkeit zu verbessern, Draht evtl. mit Silikonöl schmieren..
- * Das Profil aus Papier ist als SV gut geeignet, da es sich sehr leicht anfertigen lässt und auch für schwächere Föhne geeignet ist. Ähnliches gilt für das Modell aus Karton, das aber deutlich schwerer ist. Das Styropormodell sollte als Demo-Modell verwendet werden.



Beobachtung

Beim Anblasen des Profils steigt das Profil entlang des Drahtes in die Höhe.

Erklärung

Vgl. Erklärung von Versuch 13.

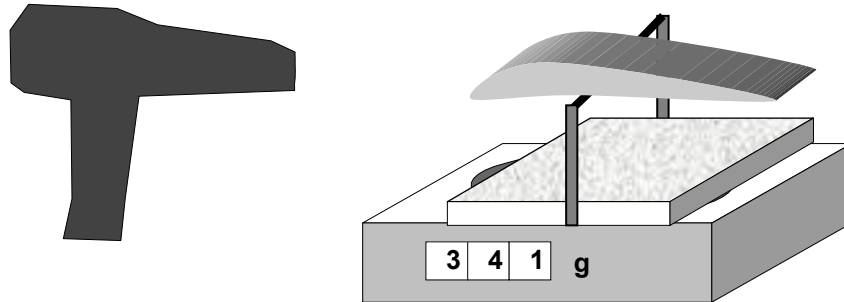
Versuch 15 (LV/SV)

Aufbau

Waage, Föhn mit aufsteckbarer Düse, Profilkörper, der drehbar in einem Gestell befestigt ist (Profilkörper mit Halterung selbst bauen, siehe Anhang oder komplett für ca. 90 € im Fachhandel bestellen)

Durchführung

Der Profilkörper wird auf Unterlegbrettchen gestellt und mit dem stärksten Luftstrom des Föhns angeblasen.



Beobachtung

Beim Anblasen des Profils zeigt die Waage ein um einige Gramm geringeres Gewicht an.

Erklärung

Vgl. Erklärung von Versuch 13.

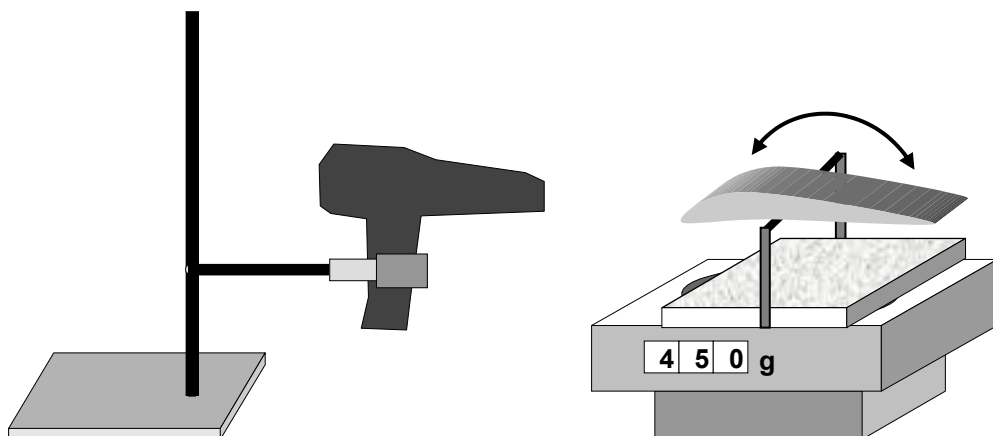
Versuch 16 (LV/SV)

Aufbau

Waage, Föhn mit aufsteckbarer Düse, Profilkörper, der drehbar in einem Gestell befestigt ist, Stativ, Stativklemme, Doppelmuffe, Unterlegbrettchen bzw. Klötze

Durchführung

- Der Föhn wird mit Hilfe von Stativ, Stativklemme und Doppelmuffe fixiert und in ca. 10 cm Abstand zum Profilkörper gebracht. Der Profilkörper wird durch Unterlegung mit Brettchen auf die Höhe der Föhndüse gebracht.
- Der Profilkörper wird mit dem stärksten Luftstrom des Föhns angeblasen.
- Der Anstellwinkel des Profilkörpers wird kontinuierlich verstellt.



Beobachtung

Der Auftrieb wird durch den Anstellwinkel des Profilkörpers beeinflusst.

Erklärung

Die Luftströmung und damit die Druckverhältnisse werden durch den Anstellwinkel des Profils beeinflusst, wobei sich bei einem bestimmten Winkel ein optimaler Auftriebswert einstellt. Andererseits reißt bei einem kritischen Winkel die Strömung ab. Vgl. Sachinformationen S. 5.

BEISPIELE AUS NATUR, ALLTAG UND TECHNIK

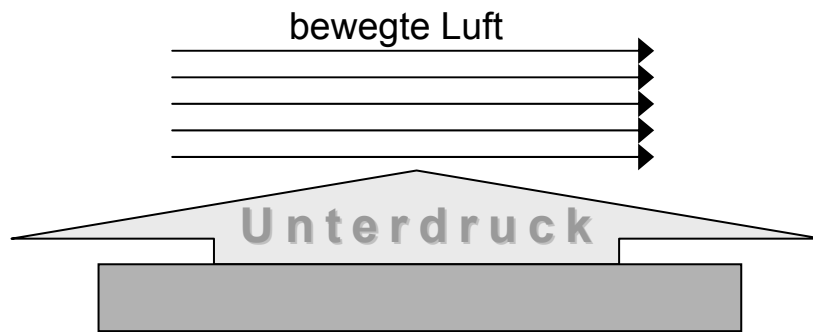
- a) Aquaplaning bei erhöhter Geschwindigkeit
- b) Spoiler bei Autos, die verhindern, dass das Fahrzeug bei hoher Geschwindigkeit die Bodenhaftung verliert, also „abhebt“
- c) Bei einem starken Sturm können Hausdächer davonfliegen, wenn im Haus Durchzug stattfindet
- d) Bei der Landung werden bei Flugzeugen Bremsklappen, die einen Teil des Auftriebs vernichten, ausgefahren
- e) Einige Militärjets, die mit sehr hohen Geschwindigkeiten fliegen, haben relativ kleine Flügel, da sie auf Grund ihrer hohen Geschwindigkeit genügend Auftrieb erhalten.
- f) Duschvorhänge, die sich bei angestellter Brause nach innen bewegen
- g) Kavitationstorpedos sind Torpedos, die sich so schnell im Wasser bewegen, dass sich um ihre Außenhaut auf Grund des sehr geringen statischen Drucks eine Dampfschicht bildet, die den Reibungswiderstand extrem herabsetzt, so dass sehr hohe Geschwindigkeiten (ca. 500 km/h) erreicht werden können (vgl. Anhang)
- h) Stall – Flugzeugbewegung, bei der die Strömung am Flügel abreißt, was zu einem Absturz führen kann
- i) In der Tierwelt ist das Fliegen der Vögel Vorbild für Flugkonstruktionen gewesen (Leonardo da Vinci, Otto Lilienthal und aus der griechischen Mythologie der Flug von Ikaros und Dädalos)

Hinweis: Im Anschluss an diese Unterrichtseinheit könnte eine Exkursion zum Flughafen bzw. zur Luftwerft unternommen werden, um dort das Thema noch einmal in einer Realbegegnung zu behandeln.

6. Auftrieb bei bewegten Körpern

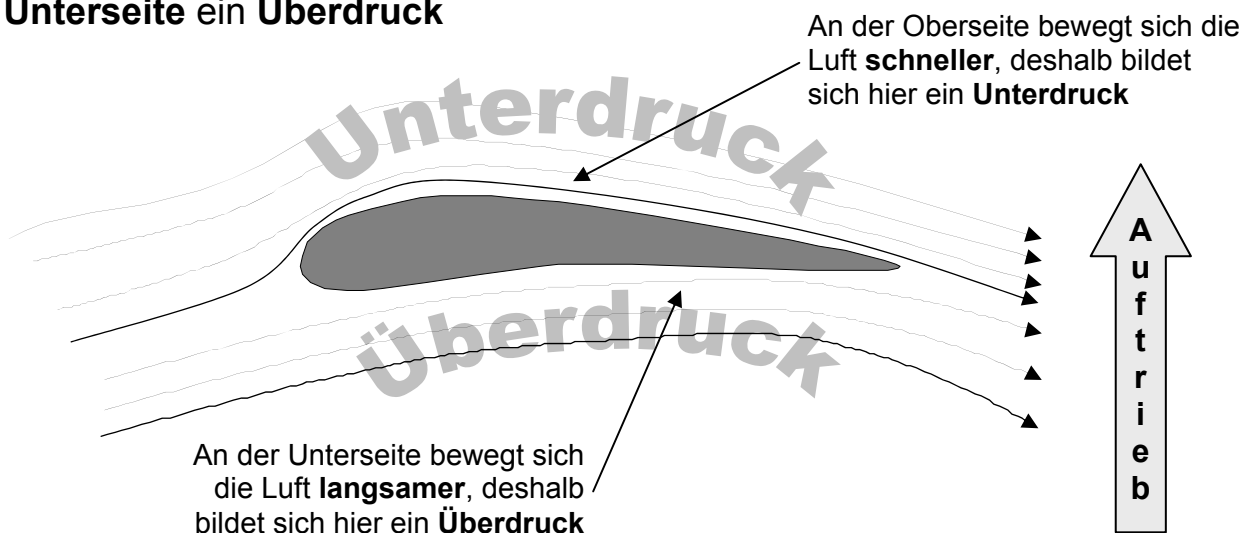
Wenn sich **Luft über einer Fläche bewegt**, dann entsteht über dieser Fläche ein **Unterdruck**.

Je **schneller** sich die Luft bewegt, desto **größer** wird der **Unterdruck**.



Hat man nun einen **geeigneten Körper**, an dessen Oberseite sich die Luft schneller bewegt als an der Unterseite, dann entsteht an der

- **Oberseite ein Unterdruck**
- **Unterseite ein Überdruck**

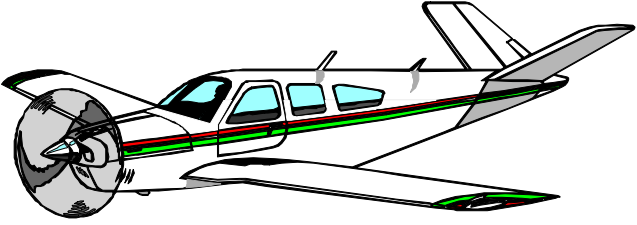
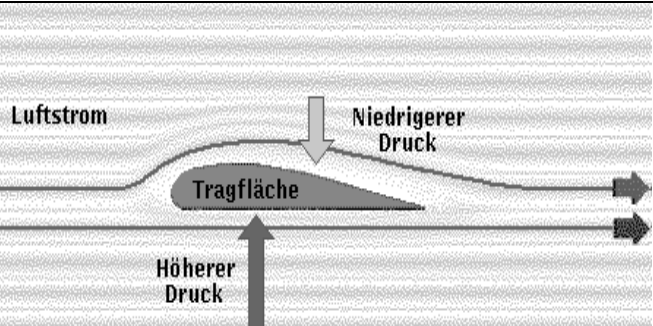
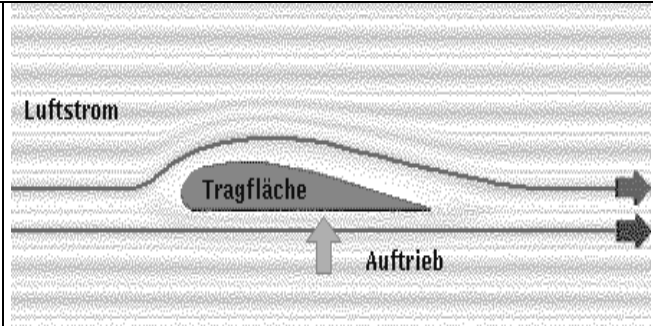


Dies führt dazu, dass eine **Auftriebskraft** entsteht und den Körper nach **oben** drückt.

Flugzeugtragflächen haben aus diesem Grund ein **gewölbtes Profil** wie in der obigen Abbildung, so dass es auf der **Unterseite zu einem Überdruck** und auf der **Oberseite zu einem Unterdruck** kommt.



Hier noch einmal das Zustandekommen der **Auftriebskraft**:

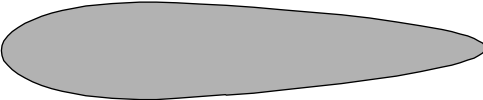
 niedriger Druck hoher Druck	 Auftriebskraft
	
 Luftstrom Niedrigerer Druck Tragfläche Höherer Druck	 Luftstrom Tragfläche Auftrieb
	
Man erkennt hier deutlich das gewölbte Tragflächenprofil	

Zeichne und beschreibe einen Versuch, wo wir herausgefunden haben, dass ein bewegter Luftstrom eine Auftriebskraft erzeugt.

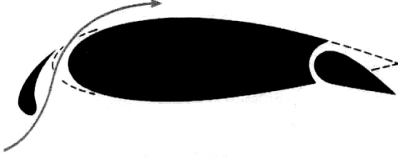
Zeichne das Tragflächenprofil eines Flugzeugs und gib an, wo sich Überdruck- und Unterdruckbereich befinden.

Warum ist das Tragflächenprofil eines Flugzeugs oben deutlich stärker gewölbt als unten?

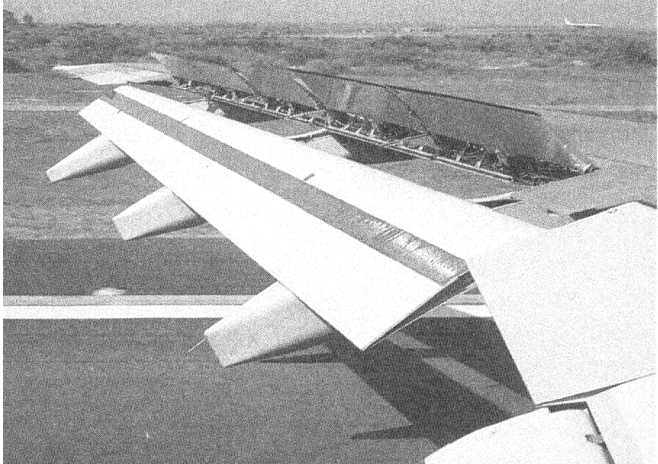
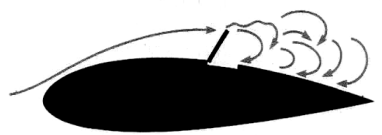
Könnte ein Flugzeug sich in die Luft erheben, wenn sein Tragflächenprofil die folgende Form und Stellung hätte? Begründe!

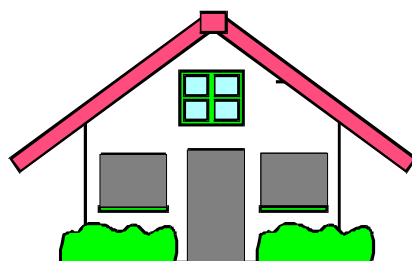
Warum werden bei Start und Landung die Tragflächen eines Flugzeugs mit Hilfe von Klappen verändert?

Nasenklappe und einfache Wölbungsklappe 	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="height: 30px;"></td></tr> <tr><td style="height: 30px;"></td></tr> <tr><td style="height: 30px;"></td></tr> <tr><td style="height: 30px;"></td></tr> <tr><td style="height: 30px;"></td></tr> </table>					

Warum werden bei der Landung eines Flugzeugs Landeklappen ausgefahren? Erkläre, was sie bewirken.

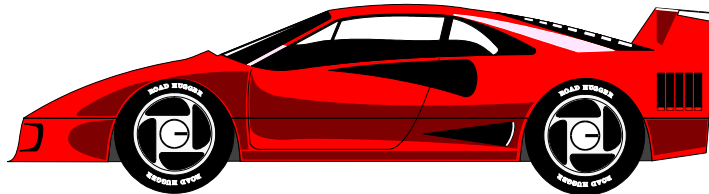
	Bremsklappe (Spoiler) 
--	---

Warum kann ein Sturm ein Hausdach abdecken?

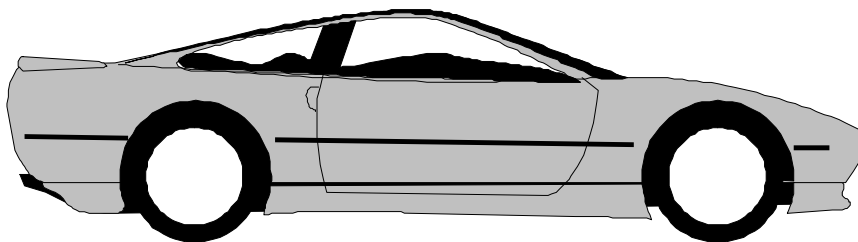


Zeichne bei der Skizze die Druckverhältnisse, die bei Sturm bei einem Haus herrschen und erkläre.

Der Audi TT hat, nachdem mehrere Unfälle passiert sind, wo das Fahrzeug bei hoher Geschwindigkeit außer Kontrolle geriet, einen Heckspoiler – ähnlich wie bei diesem Fahrzeug – bekommen. Erkläre, was dieser Heckspoiler bewirken soll? Zeichne auch!



Beim Autofahren strömt bewegte Luft um die Karosserie des Fahrzeugs. Begründe, wie hier die Druckverhältnisse aussehen müssen. Denke daran, dass die Sicherheit eines Fahrzeugs unter anderem durch gute Bodenhaftung zu Stande kommt.



Zeichne bei dieser selbstgebauten „fliegenden Kiste“, den Strömungsverlauf der Luft und die Druckverhältnisse am Flügel ein.



In einer Duschkabine bewegt sich der Vorhang, wenn Wasser aus der Dusche strömt, immer nach innen. Erkläre, warum das so ist. Denke daran, dass sich die Wasserstrahlen, die aus der Dusche herausströmen, sehr schnell bewegen.

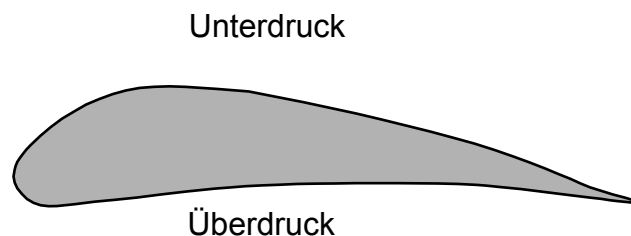
Wenn Wind seitlich an einem Haus vorbeistreicht und ein Fenster geöffnet ist, dann bewegen sich die Gardinen nach außen. Begründe, warum das so ist.

Lösungen zu Arbeitsblatt 6.3

Zeichne und beschreibe einen Versuch, wo wir herausgefunden haben, dass ein bewegter Luftstrom eine Auftriebskraft erzeugt.

Vgl. Versuche 1 - 4

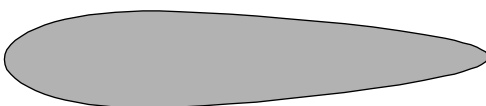
Zeichne das Tragflächenprofil eines Flugzeugs und gib an, wo sich Überdruck- und Unterdruckbereich befinden.



Warum ist das Tragflächenprofil eines Flugzeugs oben deutlich stärker gewölbt als unten?

Durch die Wölbung erhöht sich oben die Strömungsgeschwindigkeit der Luft, so dass ein Unterdruck entsteht und somit ein Auftrieb.

Könnte ein Flugzeug sich in die Luft erheben, wenn sein Tragflächenprofil die folgende Form und Stellung hätte? Begründe!

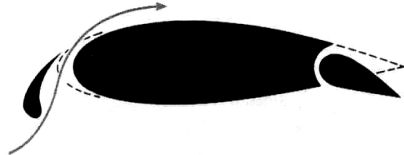


Ein Flugzeug mit diesem Tragflächenprofil könnte nicht fliegen, weil dieses Profil symmetrisch ist und daher oben und unten die gleichen Druckverhältnisse entstehen. Ein Auftrieb kann dabei nicht entstehen. Dies könnte nur geschehen, wenn sich der Anstellwinkel ändern würde.

Lösungen zu Arbeitsblatt 6.4

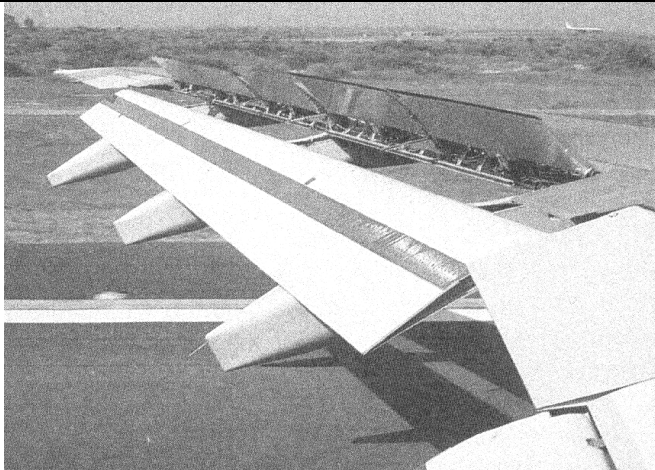
Warum werden bei Start und Landung die Tragflächen eines Flugzeugs mit Hilfe von Klappen verändert?

Nasenklappe
und einfache
Wölbungsklappe

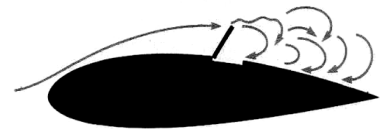


Mit Hilfe der Klappen werden die Tragfläche vergrößert und das Tragflächenprofil verändert. Beide Maßnahmen dienen dazu, den Auftrieb bei Start und Landung zu verstärken.

Warum werden bei der Landung eines Flugzeugs Landeklappen ausgefahren? Erkläre, was sie bewirken.

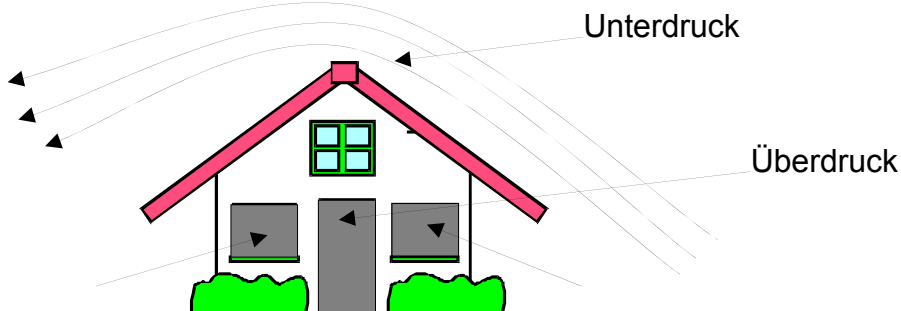


Bremsklappe
(Spoiler)



Die Landeklappen bewirken, dass die Luftströmung, die den Auftrieb verursacht, abreißt. Der Auftrieb wird dadurch stark verringert und das Flugzeug wird an den Boden gepresst.

Warum kann ein Sturm ein Hausdach abdecken?

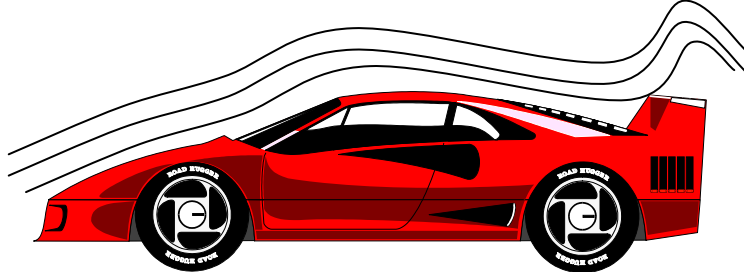


Zeichne bei der Skizze die Druckverhältnisse, die bei Sturm bei einem Haus herrschen und erkläre.

Ein starker Luftstrom, der sich an einem Dach entlang bewegt, bewirkt einen starken Unterdruck. Sind nun im Haus Türen bzw. Fenster geöffnet, kann der Wind im Inneren des Hauses einen Überdruck erzeugen. Dies führt dazu, dass das Dach abgedeckt werden kann.

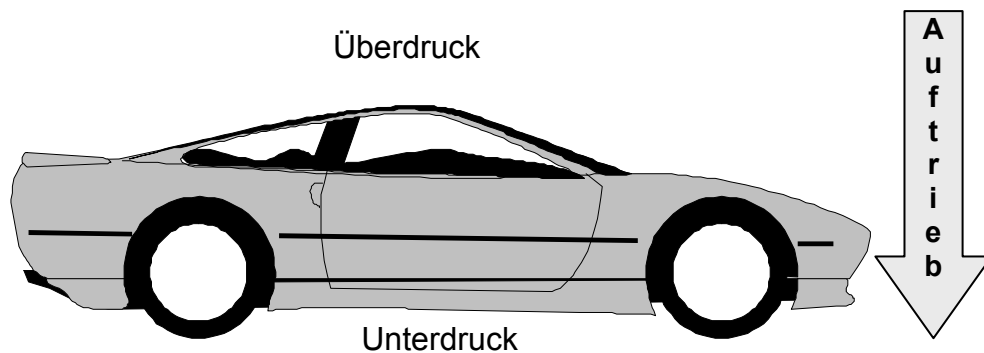
Lösungen zu Arbeitsblatt 6.5

Der Audi TT hat, nachdem mehrere Unfälle passiert sind, wo das Fahrzeug bei hoher Geschwindigkeit außer Kontrolle geriet, einen Heckspoiler – ähnlich wie bei diesem Fahrzeug – bekommen. Erkläre, was dieser Heckspoiler bewirken soll? Zeichne auch!



Der Heckspoiler bewirkt, dass der Auftrieb, den das Fahrzeug bei hoher Geschwindigkeit erhält und der zu mangelhafter Bodenhaftung der Reifen führt, durch Wirbelbildung reduziert wird.

Beim Autofahren strömt bewegte Luft um die Karosserie des Fahrzeugs. Begründe, wie hier die Druckverhältnisse aussehen müssen. Denke daran, dass die Sicherheit eines Fahrzeugs unter anderem durch gute Bodenhaftung zu Stande kommt.



Bei einem Fahrzeug darf bei höherer Geschwindigkeit die Bodenhaftung nicht nachlassen, d.h. der Auftrieb darf nicht zu stark werden. Aus diesem Grund muss der Luftstrom so gelenkt werden, dass auf der Unterseite ein Unterdruck herrscht; die Luft muss sich unter dem Auto also schneller bewegen als über dem Auto.

Zeichne bei dieser selbstgebauten „fliegenden Kiste“, den Strömungsverlauf der Luft und die Druckverhältnisse am Flügel ein.



Lösungen zu Arbeitsblatt 6.6

In einer Duschkabine bewegt sich der Vorhang, wenn Wasser aus der Dusche strömt, immer nach innen. Erkläre, warum das so ist. Denke daran, dass sich die Wasserstrahlen, die aus der Dusche herausströmen, sehr schnell bewegen.

Da die Wasserstrahlen, die aus der Dusche herausströmen, sich schnell bewegen, reißen sie auch die umgebenden Luftteilchen mit. Da in schnell strömender Luft der Druck geringer ist als in ruhender Luft, herrscht dort ein Unterdruck. Dieser Unterdruck sorgt dafür, dass der Duschvorhang durch den höheren Druck der umgebenden Luft in die Duschkabine hineingedrückt wird.

Wenn Wind seitlich an einem Haus vorbeistreicht und ein Fenster geöffnet ist, dann bewegen sich die Gardinen nach außen. Begründe, warum das so ist.

In schnell bewegter Luft herrscht ein Unterdruck. Da der Luftdruck im Hause größer ist, strömt Luft von innen nach außen und bewegt dabei den Vorhang. Dieser bewegt sich dadurch nach außen.

7. Bau eines Fluggleiters

Hinweis: Um nun das Fliegen in einer Realbegegnung kennen zu lernen, bauen die Schüler einen einfachen Fluggleiter, bei dem der Anstellwinkel der Tragfläche und der Schwerpunkt verstellt werden können. Um die Motivation noch weiter zu steigern, kann ein Wettbewerb durchgeführt werden, den derjenige gewonnen hat, dessen Fluggleiter am weitesten geflogen ist. Damit möglichst gute Flugergebnisse erzielt werden, ist darauf zu achten, dass der Gleiter von oben auf einer leicht nach unten geneigten Geraden geworfen wird.*

Material

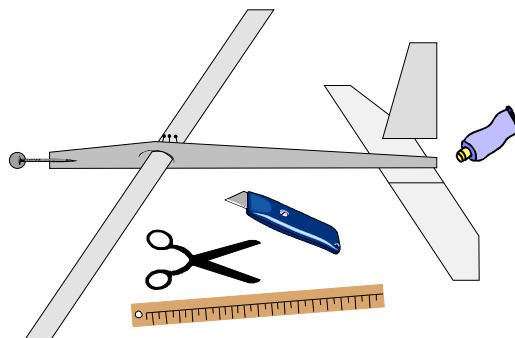
Wellpappe (Pappkartons verwenden), Zeichenkarton, Nagel (ca. 4 - 6 cm, $\varnothing$ ca. 2 – 3 mm), Wachs oder Plastilinkugel ($\varnothing$ ca. 0,8 – 1 cm), Kunststofflamelle ca. 2,5 cm $\times$ 39 cm von Jalousette (evtl. in entsprechenden Fachgeschäften - z.B. Jaloucity - ggf. als Verschnitt besorgen), Kleber (Pattex, Uhu oder Ähnliches), 3 Stecknadeln

Werkzeuge

Teppichmesser oder Eddingmesser oder scharfe Schere, Stahllineal, Unterlage

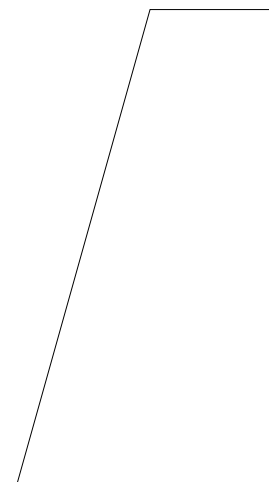
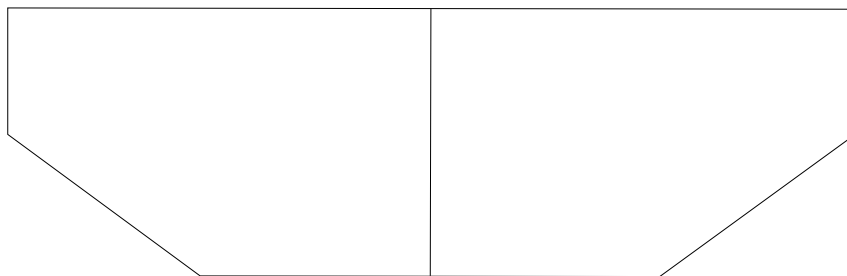
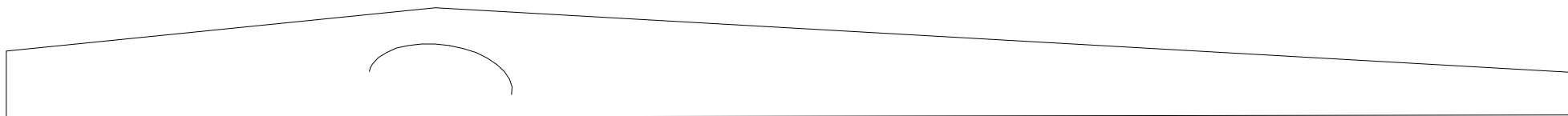
Bauanleitung

- Musterblatt mit Schablonen auf A3 vergrößern.
- Schablonen für Rumpf, Seitenleitwerk und Höhenruder ausschneiden.
- Rumpf aus dicker Wellpappe (dicken Pappkarton verwenden), auf die zuvor die Schablone aufgeklebt wurde, mit Hilfe eines Lineals ausschneiden; Unterlage verwenden.
- Zum Schneiden entweder Teppichmesser (Vorsicht, sehr scharf! Verletzungsgefahr!) oder scharfe Schere verwenden.
- Seitenleitwerk und Höhenleitwerk mit Hilfe der Schablonen aus Zeichenkarton anfertigen.
- Rumpf entsprechend Vorlage vorne bogenförmig einschneiden.
- Rumpf am Ende senkrecht einschneiden und Seitenleitwerk einkleben.
- Höhenleitwerk von unten mittig und waagrecht an den Rumpf kleben.
- Kunststofflamelle durch den bogenförmigen Einschnitt schieben und mit den Stecknadeln mittig fixieren.
- Zur Stabilisierung wird vorne ein Nagel in den Rumpf geschoben; eventuell kleine Wachs- bzw. Plastilinkugel am Kopf des Nagels befestigen. Falls keine Plastilinkugel verwendet wird, Gleiter zum Schutz an der Spitze mit Klebebandband umwickeln.
- Zum Trimmen Nagel mit Plastilinkugel vorn in den Rumpf schieben; eventuell auch am Heck Ausgleichsmassen anbringen (z.B. kl. Nagel, Büroklammer); Nagel evtl. verkleben.
- Um den Flug des Gleiters zu optimieren, Flügel und Nagel entsprechend verstellen.



* Die Idee zu diesem Fluggleiter stammt von dem Hamburger Techniklehrer Dieter Grieschat.

Musterblatt mit Schablonen für Fluggleiter



8. Raketenflug

Hinweis: Man kann die Schüler fragen, welche Flugphänomene es außer den bisher besprochenen noch gibt. Ein weiterer Hinweis wäre, dass es Flugkörper gibt, die keine Flügel besitzen.

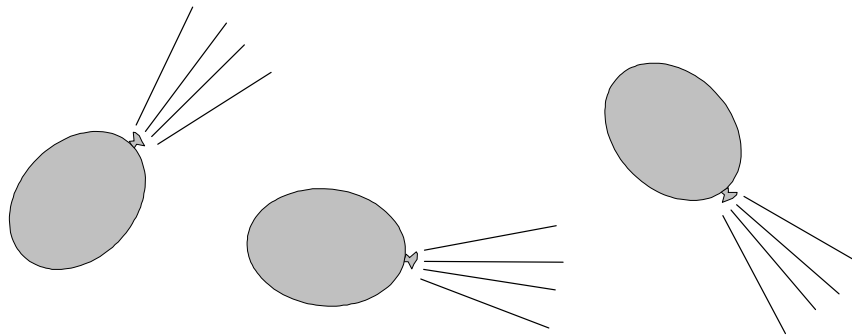
Versuch 1 (SV)

Aufbau

Luftballon

Durchführung

Die Luftballons werden aufgeblasen und dann losgelassen.



Beobachtung

- a) Die Ballons fliegen auf einer nichtlinearen Bahn kreuz und quer durch den Raum.
- b) Die Öffnung des Ballons zeigt immer nach hinten, d.h. entgegen zur Flugrichtung.
- c) Wenn sich im Ballon keine Luft mehr befindet, d.h. wenn kein Druck mehr vorhanden ist, dann fällt er zu Boden.

Erklärung

Bei dem Flug des Ballons wird das Raketenprinzip sichtbar:

Ein Stoff (Masse) – in diesem Fall Luft – muss ausströmen (möglichst mit hoher Geschwindigkeit), damit eine Kraft entsteht, die den Ballon in Bewegung setzt. Sobald der Luftstrom nicht mehr vorhanden ist, verliert der Ballon an Bewegung und fällt zu Boden. Die Kraft, die den Ballon antreibt, nennt man Rückstoß oder Schub.

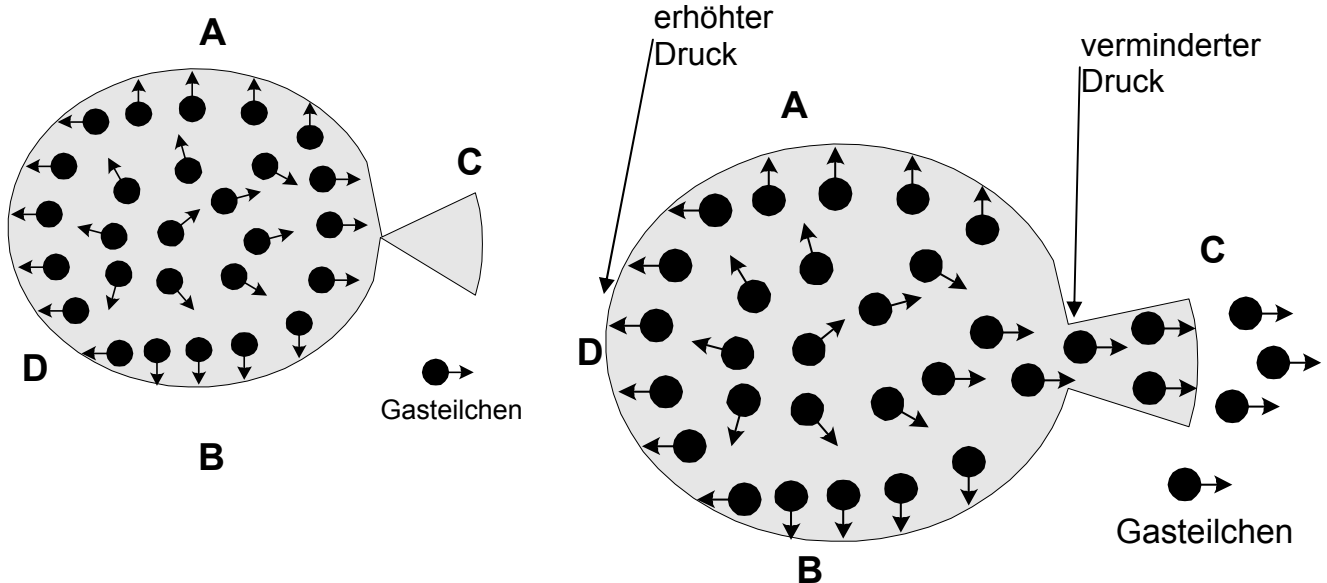
Die Ursache dieser Kraft besteht darin, dass der im Ballon vorhandene Druck einmal dafür sorgt, dass die Luft nach hinten ausströmt, zu anderen aber als Gegenwirkung den Rückstoß bzw. Schub erzeugt, der den Ballon in Gegenrichtung der ausströmenden Luft beschleunigt (hier gilt das newtonsche Prinzip von $\text{actio} = \text{reactio}$ bzw. dass eine Kraft immer eine Gegenkraft erzeugt).

Man kann sich das so vorstellen, dass die im Ballon zusammengepresste Luft nach allen Seiten einen gleichmäßigen Druck ausübt. Wird nun das Mundstück geöffnet ergibt sich der folgende Sachverhalt:

- der Druck auf die seitlichen Flächen A und B hebt sich gegenseitig auf
- in Richtung C wird die Luft aus dem Mundstück gedrückt, in Richtung D ergibt sich ein Vortrieb (Schub)

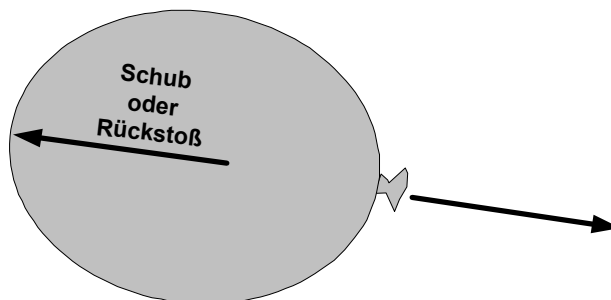
Diese Schubkraft kann man sich so erklären, dass bei Öffnung des Mundstücks nur hier ein Druckausgleich stattfinden kann. Die im Ballon enthaltene Luft tritt dabei mit einer dem Druckunterschied und der Größe des Mundstücks proportionalen Geschwindigkeit aus.

Dabei wird das Druckgleichgewicht an der gegenüberliegenden Wand D entsprechend der Mundstückgröße einseitig verschoben, so dass hier eine entsprechende Schubkraft entsteht, die den Ballon vorwärts treibt.



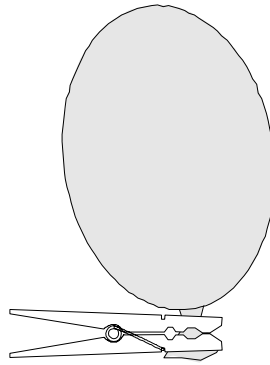
Im Verschlussenen Ballon üben die Gasteilchen nach allen Seiten einen gleichmäßigen Druck aus

Bei geöffnetem Mundstück treten die Gasteilchen entsprechend dem Innendruck und der Öffnungsgröße bei Seite C nach hinten aus. In diesem Augenblick ist hier der Druck gegenüber der Seite D vermindert, so dass die Gasteilchen dort eine entsprechend größere Kraft ausüben und so für einen Schub sorgen. Der Druck auf die Seitenflächen Flächen A und B hebt sich auf.



Wichtig ist, dass darauf hingewiesen wird, dass diese Kraft nicht nur in Luft, Wasser oder irgendeinem anderen Medium wirksam ist, sondern auch im Vakuum wirkt.

Hinweis: Wenn der Ballon aufgeblasen ist, ist es etwas schwierig, den Versuch weiter aufzubauen, da immer das Mundstück zugehalten werden muss. Dies kann dadurch gelöst werden, dass man das Mundstück einmal dreht und dann mit einer Wäscheklammer verschließt; ohne Drehung des Mundstückes kann immer noch etwas Luft entweichen.



Versuch 2 (SV/LV)

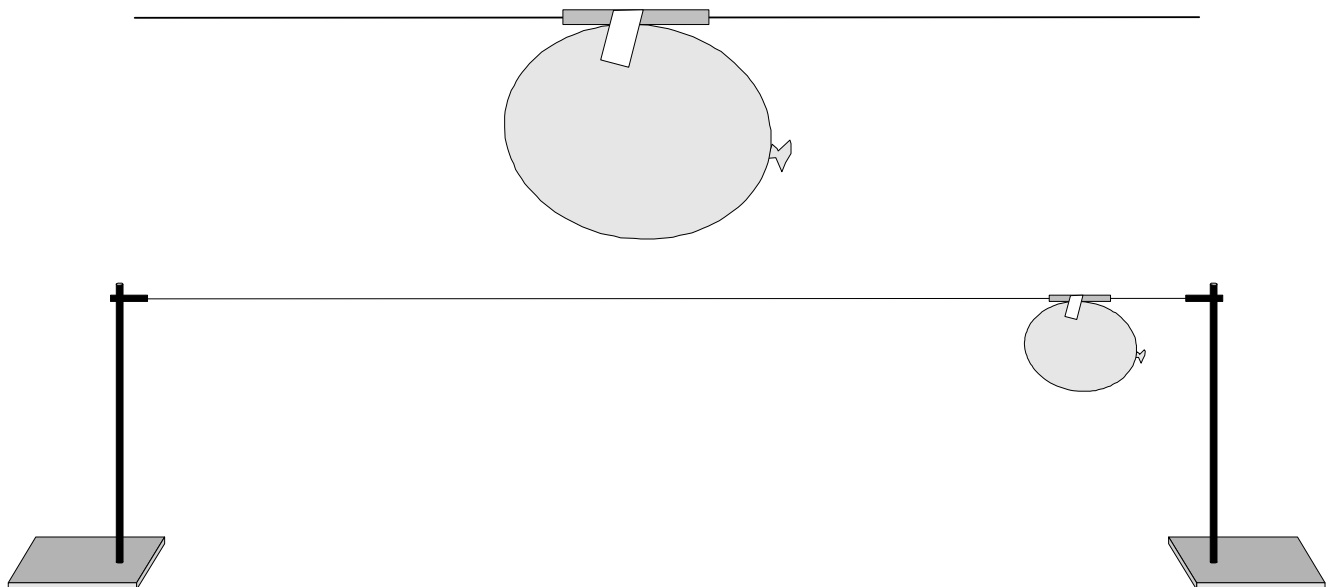
Aufbau

Luftballon, Schere, Trinkhalm, Klebeband, einige Meter Zwirnsfaden (oder dünner, lackierter Kupferdraht $\varnothing$ 0,2 mm), 2 Stative mit Doppelmuffen (oder Hakenmuffen)

Durchführung

Bei Aufbau und Durchführung des Versuches ist es vorteilhaft, Schüler mitwirken zu lassen.

- Zwei Stative mit Doppelmuffen werden in möglichst großem Abstand aufgebaut.
- Es wird ein ca. 5 cm langes Stück von einem Trinkhalm abgeschnitten und mittig auf einem ca. 5 – 7 cm langen Klebestreifen befestigt.
- Der Luftballon wird sehr stramm aufgeblasen (die Öffnung wird natürlich zugehalten) und der Klebestreifen mit dem Trinkhalmstück wird mittig auf seiner Oberseite befestigt.
- Der Zwirnsfaden wird an der Doppelmuffe (Hakenmuffe) des ersten Stativs befestigt.
- Das andere Ende des Zwirnsfadens wird durch das Trinkhalmstück am aufgeblasenen Ballon geschoben und dann an dem zweiten Stativ befestigt.
- Der Ballon wird zum zweiten Stativ hin gezogen und seine Öffnung wird dann freigegeben.



Beobachtung

- Der Ballon fliegt geradeaus, da er durch den Faden geführt wird.
- Er fliegt so lange, wie hinten Luft ausströmt.

Erklärung

Wie Versuch 1.

Versuch 3 (SV/LV)

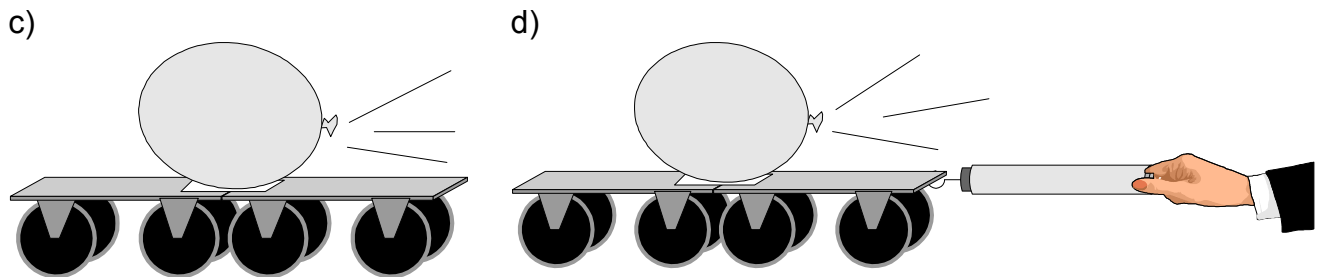
Aufbau

2 Experimentierwagen, empfindlicher Kraftmesser, Luftballon, Schere, Klebeband, Teppichklebeband (Doppelklebeband)

Durchführung

Bei Aufbau und Durchführung des Versuches ist es vorteilhaft, Schüler mitwirken zu lassen.

- 2 Experimentierwagen werden mit Klebeband verbunden (ein Experimentierwagen hat bei diesem Versuch nicht genügend Stabilität und kippt daher leicht um).
- Es wird mittig ein Stück Doppelklebeband auf die Experimentierwagen geklebt.
- Der stramm aufgeblasene Ballon wird mit seiner Unterseite mittig auf den Klebestreifen des Experimentierwagens gedrückt und seine Öffnung wird dann freigegeben.
- Wie c), aber am hinteren Experimentierwagen wird ein Kraftmesser befestigt, der entweder mit der Hand gehalten oder an einer Hakenmuffe befestigt wird.



Beobachtung

- Der Wagen bewegt sich.
- Der Kraftmesser zeigt eine, wenn auch geringe Kraft in Gegenrichtung der ausströmenden Luft an.

Erklärung

Die Schubkraft bzw. der Rückstoß konnten quantitativ nachgewiesen werden. Ansonsten Erklärung wie Versuch 1.

Versuch 4 (SV/LV)

Aufbau

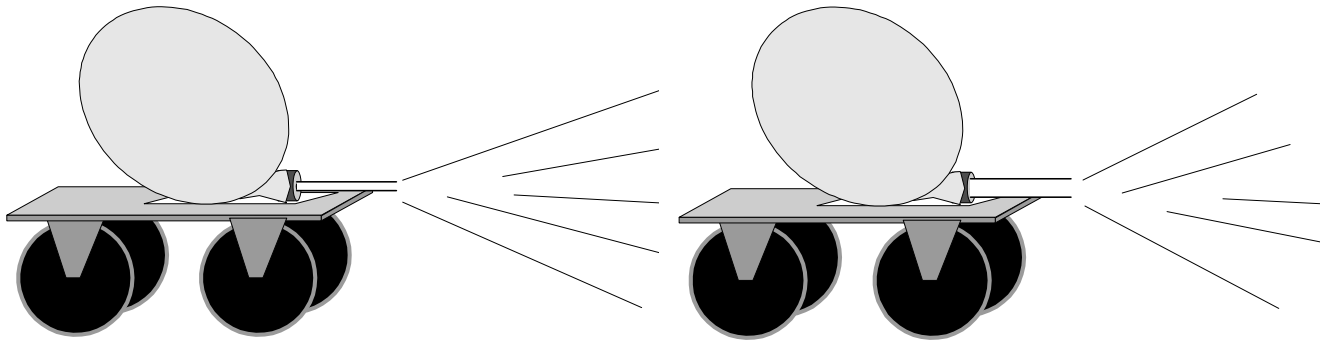
Experimentierwagen, Luftballon, Schere, Teppichklebeband (Doppelklebeband), Stopfen mit einer Bohrung (muss stramm in dem Mundstück des Ballons sitzen), Glasrohr dünn (kleiner Innendurchmesser) ca. 5 cm lang, Glasrohr dick (großer Innendurchmesser) ca. 5 cm lang, evtl. empfindlicher Kraftmesser

Durchführung

Bei Aufbau und Durchführung des Versuches ist es vorteilhaft, Schüler mitwirken zu lassen.

- Es wird ein Stück Doppelklebeband etwas weiter hinten auf den Experimentierwagen geklebt.
- In das Mundstück des Ballons wird der mit dem dicken Glasrohr versehene Stopfen eingeführt.
- Der Ballon wird durch das Glasrohr stramm aufgeblasen und dieses wird mit dem Finger verschlossen.
- Das Glasrohr wird fest auf das Klebeband gedrückt und die Mündung wird freigegeben.

- f) Gleicher Versuch mit dem dünnen Glasrohr.
- g) Bei den Versuchen kann auch ein Kraftmesser hinten am Wagen angebracht werden, um die Schubkraft quantitativ zu zeigen.



Beobachtung

Das Glasrohr mit dem großen Durchmesser sorgt für eine deutlich größere Beschleunigung als das mit dem geringeren Durchmesser.

Erklärung

Vgl. Versuch 1. Hier wird deutlich, dass die Menge der ausströmenden Luft, d.h. ihre Masse, die Schubkraft bzw. den Rückstoß beeinflusst.

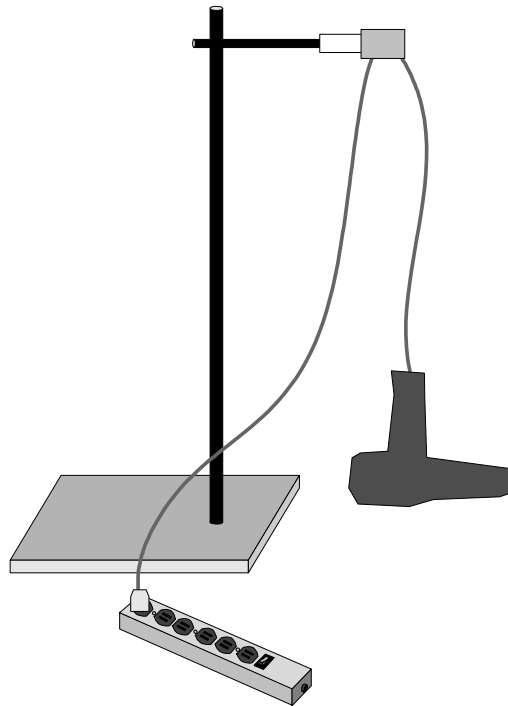
Versuch 5 (LV)

Aufbau

Föhn, schaltbare Steckdose, evtl. Verlängerungskabel, Stativ, Doppelmuffe, Stativklemme

Durchführung

- a) Das Kabel des Föhns wird mit Hilfe der Stativklemme so befestigt, dass er wenige Zentimeter über dem Boden locker herabhängt.
- b) Der Föhn wird eingeschaltet (nur Kaltstufe) und mit der schaltbaren Steckdose verbunden.
- c) Der Strom wird über die schaltbare Steckdose eingeschaltet.
- d) Es können unterschiedliche Gebläsestufen eingestellt werden.



Beobachtung

- a) Der Föhn bewegt sich in Gegenrichtung zu dem Luftstrom.
- b) Bei geringerer Gebläsestufe bewegt sich der Föhn geringer.

Erklärung

Vgl. Erklärung Versuch 1. Hier wird auch deutlich, dass Menge und Geschwindigkeit der ausströmenden Luft, d.h. ihre Masse, die Schubkraft bzw. den Rückstoß beeinflussen. Je größer und je schneller die nach hinten strömende Masse ist, desto größer die Schubkraft einer Rakete bzw. eines auf Raketenprinzipien basierenden Systems.

Versuch 6 (LV)

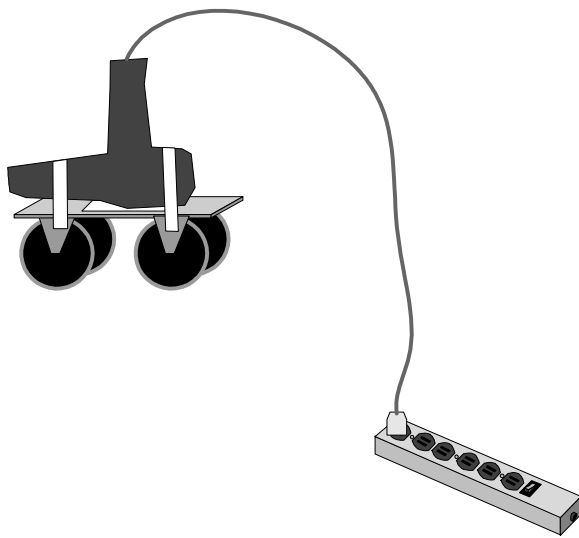
Aufbau

Experimentierwagen, Föhn, schaltbare Steckdose, evtl. Verlängerungskabel, Stativ, Doppelmuffe, Stativklemme, empfindlicher Kraftmesser, Luftballon, Schere, Klebeband, Teppichklebeband (Doppelklebeband)

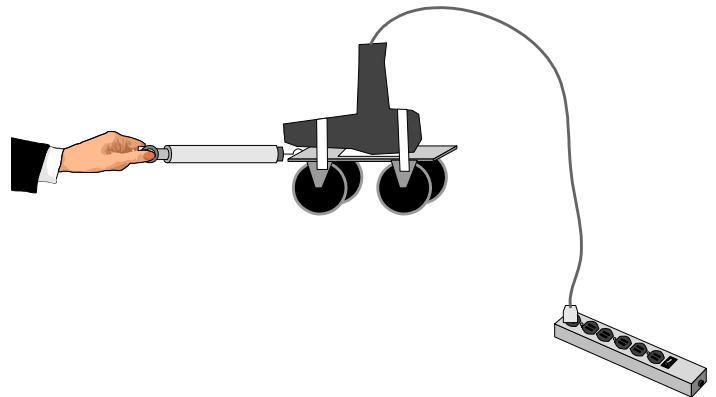
Durchführung

- a) Auf den Experimentierwagen wird ein Streifen Doppelklebeband geklebt.
- b) Der Föhn wird mit seiner Oberseite auf diesen Streifen gedrückt und anschließend noch mit ein oder zwei Streifen normalen Klebebands befestigt.
- c) Der Föhn wird eingeschaltet (nur Kaltstufe) und mit der schaltbaren Steckdose verbunden.
- d) Der Strom wird über die schaltbare Steckdose eingeschaltet.
- e) Es können unterschiedliche Gebläsestufen eingestellt werden.
- f) An dem Experimentierwagen kann ein Kraftmesser befestigt werden (vgl. Versuch 3).

d)



f)



Beobachtung

- a) Der Experimentierwagen bewegt sich in Gegenrichtung zu dem Luftstrom und übt eine Kraft aus.
- b) Bei geringerer Gebläsestufe bewegt sich der Wagen langsamer (evtl. muss er auch etwas angeschoben werden, um die Reibungskraft zu überwinden).

Erklärung

Vgl. Erklärung Versuch 1. Hier wird deutlich, dass Menge und Geschwindigkeit der ausströmenden Luft, d.h. ihre Masse, die Schubkraft bzw. den Rückstoß beeinflussen.

Je größer und je schneller die nach hinten strömende Masse ist, desto größer die Schubkraft einer Rakete bzw. eines auf Raketenprinzipien basierenden Systems.

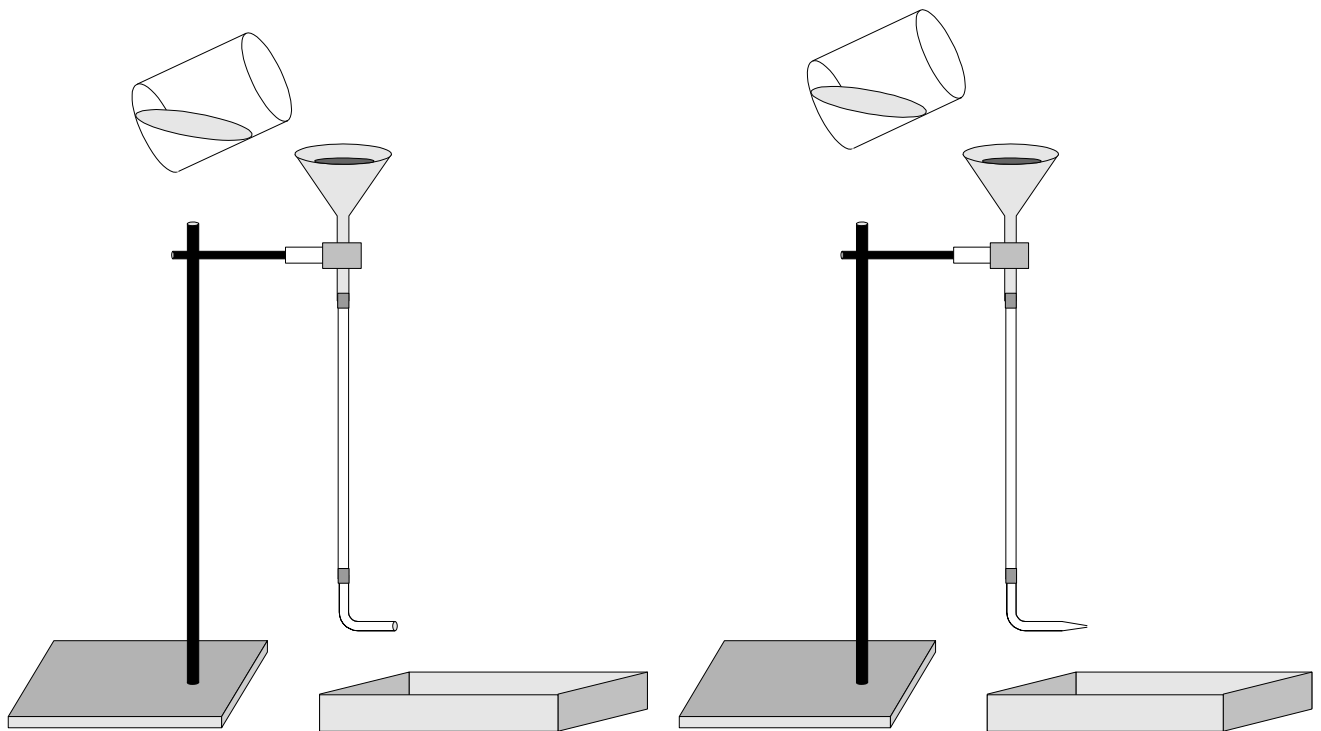
Versuch 7 (LV)

Aufbau

Stativ mit langer Stativstange, Stativklemme, Doppelmuffe, großes Becherglas, 2 Glasrohre mit etwas größerem Durchmesser (ca. 60 cm lang und ca. 30 cm lang), Winkelrohr (gleichschenkelig), Winkeldüse (gleichschenkelig), 2 Schlauchstücke ca. 4 – 5 cm lang, großer Trichter, große Kunststoffwanne

Durchführung

- a) Die Stativklemme wird mit Hilfe der Doppelmuffe weit oben befestigt.
- b) Der Trichter wird mit der Stativklemme oben fixiert und mit Hilfe eines Gummischlauchstücks mit dem langen Glasrohr verbunden.
- c) Das untere Ende des Glasrohrs wird mit Hilfe des zweiten Schlauchstücks mit der Winkeldüse verbunden.
- d) Unter die Winkeldüse wird eine große Kunststoffwanne gestellt.
- e) Die Glasdüse wird mit dem Finger verschlossen und es wird Wasser in den Trichter eingefüllt.
- f) Die Öffnung der Düse wird freigegeben.
- g) a – f) wird mit dem kurzen Glasrohr durchgeführt.



Beobachtung

- Bei der Winkeldüse mit dem geringeren Querschnitt ist der Rückstoß geringer als bei dem Winkelrohr mit dem größeren Querschnitt.
- Bei dem kurzen Glasrohr verhalten sich Winkeldüse und Winkelrohr genau wie bei den Versuchen mit dem langen Rohr; der Rückstoß ist hier aber geringer.

Erklärung

Vgl. Erklärung Versuch 1. Bei diesem Versuch wird deutlich, dass Ausströmgeschwindigkeit und ausströmende Masse den Rückstoß bzw. die Schubkraft beeinflussen. Bei dem längeren Rohr ist die Ausströmgeschwindigkeit auf Grund der größeren Fallhöhe größer als bei dem kurzen Rohr; die ausströmende Masse ist bei dem Winkelrohr größer als bei der Winkeldüse. Je größer Masse und Ausströmgeschwindigkeit, desto größer die Schubkraft bzw. der Rückstoß und umgekehrt.

Versuch 8 (SV)

Aufbau

Stativ mit langer Stativstange, Stativklemme, Doppelmuffe, 2 Glasrohre mit etwas größerem Durchmesser (ca. 60 cm lang und ca. 30 cm lang), Winkelrohr (gleichschenkelig), Winkeldüse (gleichschenkelig), 2 Schlauchstücke ca. 4 – 5 cm lang, große Kunststoffwanne, langer Schlauch

Durchführung

- Das Glasrohr wird mit einem langen Schlauch an einen Wasserhahn angeschlossen.
- Die Durchflussmenge wird durch stärkeres und weniger stärkeres Aufdrehen des Wasserhahns reguliert.

Beobachtung

Vgl. Versuch 7.

Erklärung

Vgl. Erklärung Versuch 7.

Versuch 9 (LV)

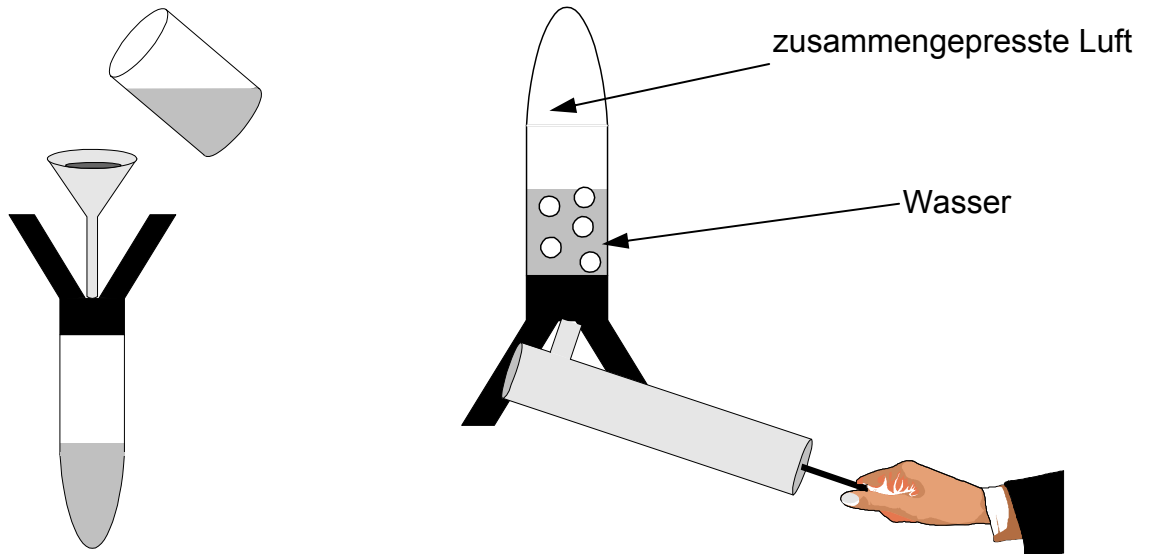
Aufbau

Drucklufrakete mit dazugehöriger Pumpe und Startvorrichtung (verschiedene Modelle),
Becherglas mit Wasser, kleiner Trichter

Durchführung

Der Versuch findet im Freien statt. Die Rakete wird zu ca. 30 – 50 % mit Wasser gefüllt. Anschließend wird sie umgedreht und es wird in den verbleibenden Raum so viel Luft wie möglich gepumpt. Vorsicht! Beim Start darauf achten, dass sie nicht auf Personen gerichtet ist, sondern senkrecht aufsteigt.

Evtl. mehrere Versuche durchführen, um die optimale Füllmenge zu ermitteln.



Modellrakete der Firma Phywe mit Pumpe und Startvorrichtung (ca. 91 €). Das Raketenmodell hat sehr stabile Flugeigenschaften.

Beobachtung

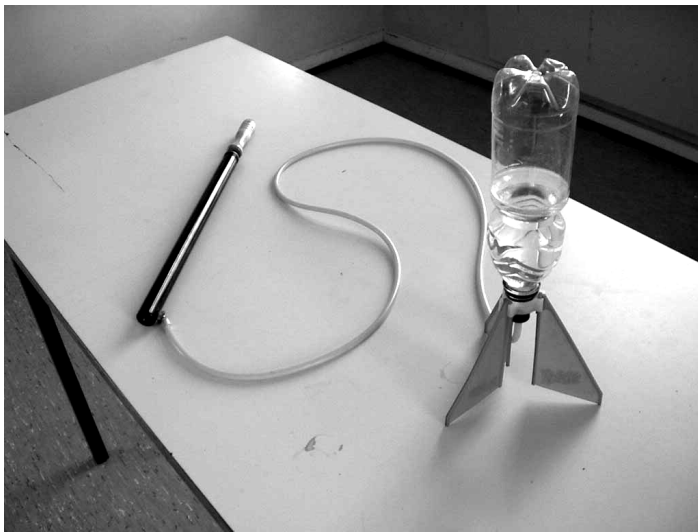
Die Rakete steigt ca. 15 - 20 m hoch.

Erklärung

Da die Luft im verbleibenden Hohlraum der Rakete sehr stark komprimiert worden ist und ihren ursprünglichen Raum wieder einnehmen möchte, drückt (presst) sie das Wasser aus der Düse nach unten heraus, so dass als Gegenkraft in die andere Richtung ein starker Rückstoß (Schubkraft, Vortrieb) entsteht und die Rakete nach oben fliegt.

Um eine größtmögliche Höhe zu erreichen, müssen Druckluft und Wassermenge ein optimales Verhältnis bilden.

Hinweis: Es gibt auch noch ein preiswerteres Raketenmodell der Firma NTL Lehrmittel. Dieses Modell hat allerdings nicht so stabile Flugeigenschaften.



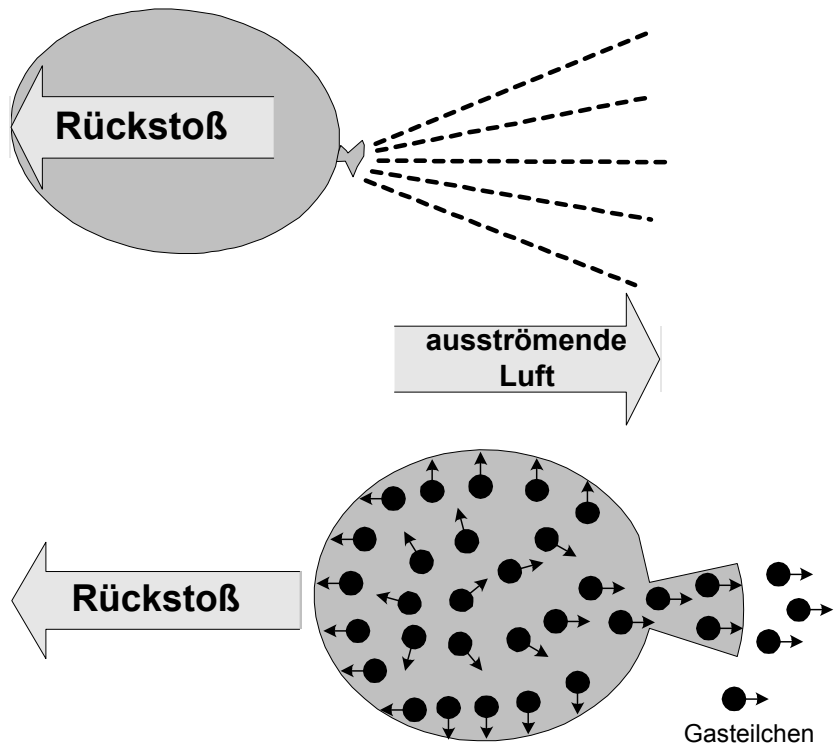
Raketenmodell der Firma NTL Lehrmittel, bestehend aus Pumpe, Schlauch mit Ventil und Gewindestutzen mit Stabilisierungsflossen für handelsübliche PET-Flaschen (ca. 56 €).

8. Warum eine Rakete fliegt

Raketen sind Flugkörper, deren **Bewegung** dadurch entsteht, dass von ihnen **Masse abgestoßen** wird.

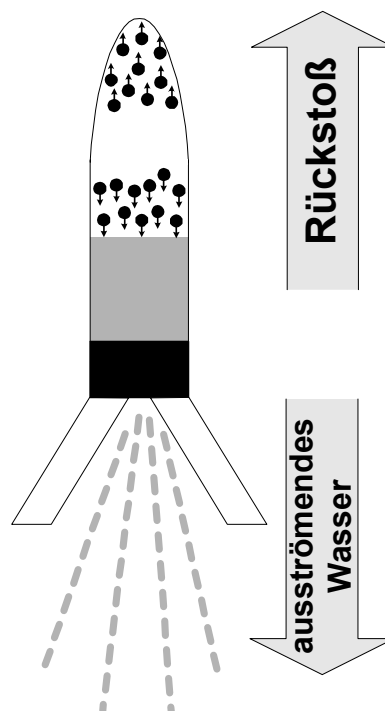
Beispiele:

Ein Luftballon stößt Luft nach hinten ab und bewegt sich nach vorn.



Die Luftteilchen im vorderen Teil des Ballons treiben ihn mit der gleichen Kraft nach vorn, mit der die Teilchen hinten herausströmen.

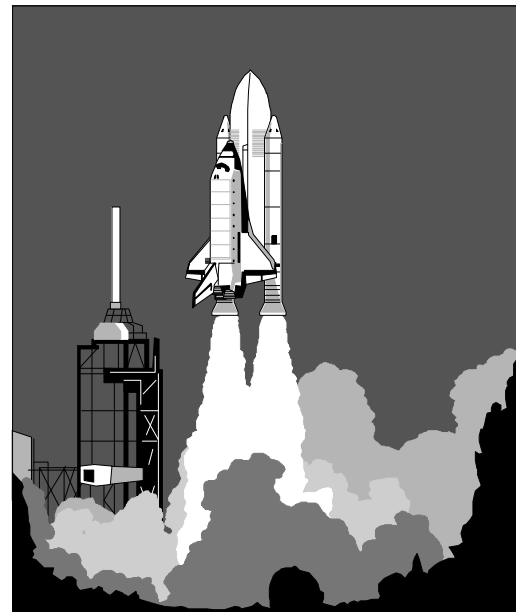
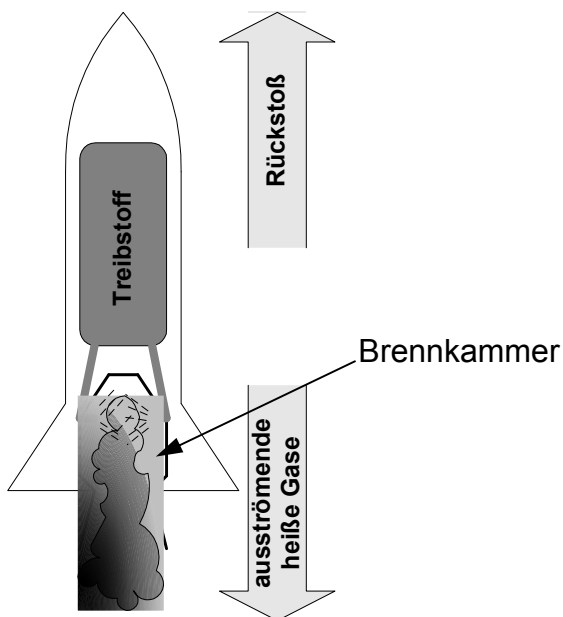
Aus einer Rakete wird Wasser nach unten abgestoßen und sie bewegt sich nach oben, weil die Luftteilchen die Rakete mit der gleichen Kraft nach oben treiben, mit der sie unten das Wasser hinausdrücken.



Die **Vorwärtsbewegung** einer Rakete, wird durch Abstoßung von Masse erzeugt. Die **Kraft**, die diese Vorwärtsbewegung erzeugt, nennt man **Rückstoß, Vortrieb oder Schubkraft**.

Der Rückstoß wird gegenwärtig durch **Verbrennung von Stoffen** erzeugt, deren **Verbrennungsgase** mit **hoher Temperatur und hoher Geschwindigkeit** aus der Brennkammer austreten.

Je größer die Menge und je **größer die Geschwindigkeit** der austretenden Gase ist, **desto größer die Schubkraft**.



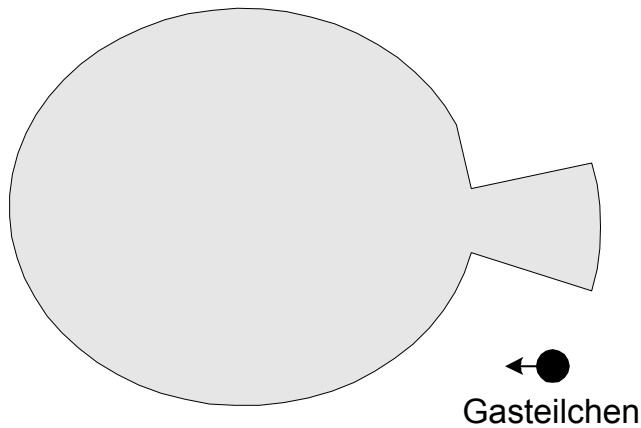
Die **Ursache der Raketenbewegung** ist der **Druck**, den die **heißen Verbrennungsgase** in der Brennkammer ausüben. Sie strömen einerseits nach **hinten** durch Düsen aus und erzeugen andererseits als **Gegenwirkung** (Gegenkraft) den **Rückstoß (Schubkraft, Vortrieb)**, der die Rakete nach **vorn beschleunigt**.

Eine Rakete funktioniert auch im **luftleeren Raum (Vakuum)**. Sie benötigt für ihre Fortbewegung **keine Luft oder irgendeinen anderen Stoff**, von dem sie sich „abstoßen“ muss.



a) Begründe, warum sich ein Luftballon, wenn hinten Luft ausströmt nach vorne bewegt, d.h. wie Rückstoß bzw. Schubkraft entstehen.

b) Stelle diesen Sachverhalt zeichnerisch mit Hilfe der bewegten Gasteilchen dar.

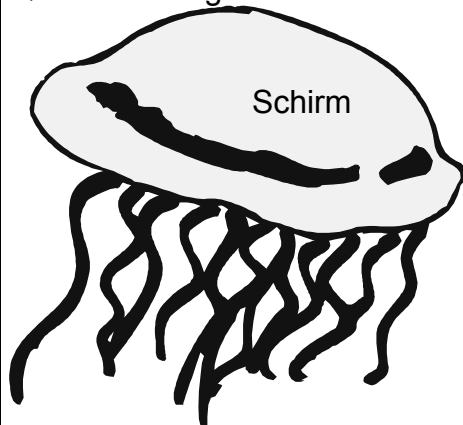


Warum steigt die Wasserrakete nicht so hoch, wenn ihr „Tank“ nur mit Luft gefüllt ist?

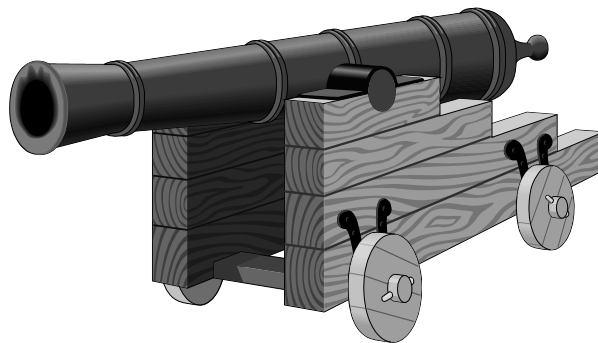
Wenn eine Rakete ins Weltall fliegt, muss sie immer Sauerstoff mitführen. Erkläre, warum das so ist.

Überlege, warum man zur Zeit immer Raketen (Mehrstufenraketen) benutzt, bei denen die Tanks nach einer gewissen Zeit abgeworfen werden?

Quallen bewegen sich nach dem Raketenprinzip fort. Erkläre!



Erkläre, warum man eine Kanone mit einer Rakete vergleichen kann. Denke daran, was beim Abfeuern geschieht und warum die Kanone Räder besitzt.



In Zukunft wird man vielleicht elektrische Antriebe (Iontriebwerk) verwenden, bei denen Metall- oder Gasatome durch elektrische Felder stark beschleunigt und dann mit hoher Geschwindigkeit ausgestoßen werden.

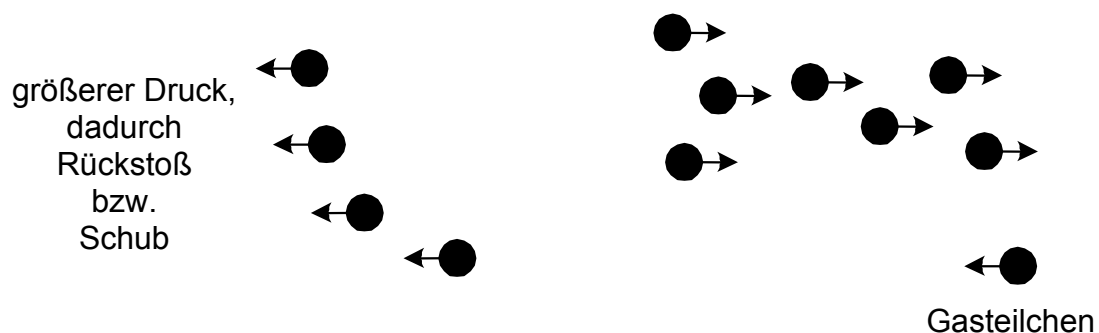
Erkläre, warum man solche Antriebe nur im Weltall, aber nicht zum Start von Raketen benutzen kann.

Lösungen zu Arbeitsblatt 8.3

- a) Begründe, warum sich ein Luftballon, wenn hinten Luft ausströmt nach vorne bewegt, d.h. wie Rückstoß bzw. Schubkraft entstehen.

Die Druckluft im Ballon übt ihren Druck, d.h. ihre Kraft, in beide Richtungen aus, so dass nach hinten ein Druck und nach vorn eine Vorwärtsbewegung, ein Schub entsteht. Der Rückstoß entsteht durch die Gasteilchen, die gegen die Vorderseite des Ballons stoßen.

- b) Stelle diesen Sachverhalt zeichnerisch mit Hilfe der bewegten Gasteilchen dar.



Warum steigt die Wasserrakete nicht so hoch, wenn ihr „Tank“ nur mit Luft gefüllt ist?

Der Schub einer Rakete hängt ab von Geschwindigkeit und Masse des ausströmenden Stoffes. Da die Luft im „Tank“ zwar eine hohe Geschwindigkeit, bedingt durch den hohen Druck hat, aber nur wenig Masse besitzt, ist ihre Schubkraft nicht besonders groß.

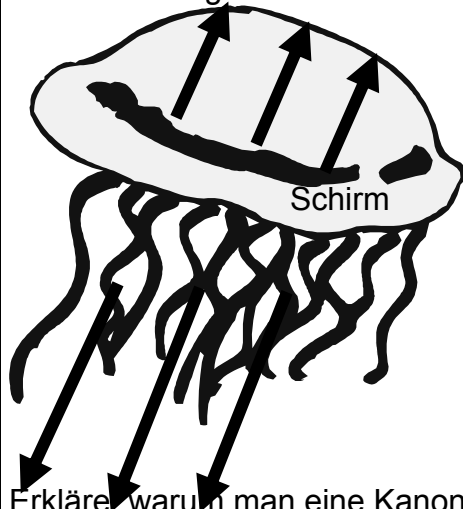
Wenn eine Rakete ins Weltall fliegt, muss sie immer Sauerstoff mitführen. Erkläre, warum das so ist.

Da im Weltall keine Luft und damit kein Sauerstoff vorhanden ist, muss dieser in Tanks mitgeführt werden, damit der Treibstoff verbrennen (oxidieren) kann.

Überlege, warum man zur Zeit immer Raketen (Mehrstufenraketen) benutzt, bei denen die Tanks nach einer gewissen Zeit abgeworfen werden?

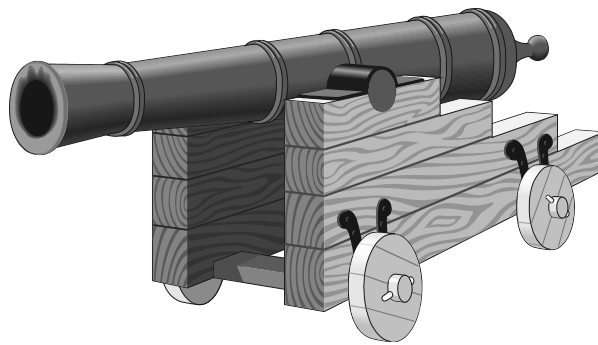
Würden die leeren (ausgebrannten) Tanks weiter mitbefördert werden, müsste der Raketenantrieb für die Masse dieser Tanks Schubkraft erzeugen. Diese zusätzliche Schubkraft, für die natürlich Treibstoff verbrauchen würde, wird durch den Abwurf der ausgebrannten Stufen eingespart.

Quallen bewegen sich nach dem Raketenprinzip fort. Erkläre!



Quallen ziehen den Rand ihres Schirms zusammen und drücken dabei Wasser nach hinten heraus. Dadurch entsteht ein Rückstoß oder Schub, der das Tier nach vorne bewegt.

Erkläre, warum man eine Kanone mit einer Rakete vergleichen kann. Denke daran, was beim Abfeuern geschieht und warum die Kanone Räder besitzt.



Bei einer Kanone wird aus der Mündung mit hoher Geschwindigkeit eine schwere Kanonenkugel herausgeschossen, die Kugel wird also von der Kanone ausgestoßen. Dadurch entsteht ein Rückstoß in Gegenrichtung. Damit die Kanone durch den Rückstoß nicht beschädigt wird, befestigt man sie auf beweglichen Rädern.

In Zukunft wird man vielleicht elektrische Antriebe (Iontriebwerk) verwenden, bei denen Metall- oder Gasatome durch elektrische Felder stark beschleunigt und dann mit hoher Geschwindigkeit ausgestoßen werden.

Erkläre, warum man solche Antriebe nur im Weltall, aber nicht zum Start von Raketen benutzen kann.

Die Metall- bzw. Gasatome verlassen das Triebwerk zwar mit hoher Geschwindigkeit, aber mit ganz geringer Masse. Dadurch ist der entstehende Rückstoß (Schubkraft) nur sehr gering; er würde niemals ausreichen, die Rakete auch nur 1 m anzuheben. Dieser Antrieb eignet sich im Weltall, wo keine Schwerkraft überwunden werden muss.

9. Sicherheitsaspekte

- Bei Unterdruckversuchen dürfen nur druckfeste Erlenmeyerkolben und druckfeste Rezipienten verwendet werden.
- Beim Verwenden der Magdeburger Halbkugeln darauf achten, dass Schüler, wenn sie daran ziehen, sich nicht durch Stürze nach hinten verletzen können.
- Beim Arbeiten mit Wasserstoff darauf achten, dass keine offenen Flammen oder Funken vorhanden sind.
- Mit Wasserstoff gefüllte Ballons im Freien zerstören.
- Beim Arbeiten mit offenen Flammen darauf achten, dass sich Schüler nicht verletzen bzw. ihre Kleidung beschädigen.
- Beim Arbeiten mit dem Metallrohr und der darunter befindlichen Tiegelschale mit brennendem Spiritus aufpassen, dass sich der Kunststoffbeutel nicht entzündet und die Schüler das heiße Rohr nicht berühren.
- Darauf achten, dass Schüler keine Verbrennungsgase von Esbit einatmen.
- Beim Verbrennen von Spiritus in einer Tiegelschale darauf achten, dass die Tiegelschale nicht umgestoßen wird. Zur Sicherheit ggf. Sand als Substrat in die Tiegelschale geben, so dass beim Umstoßen der Schale kein brennender Spiritus ausfließen kann.
- Beim Arbeiten mit Feuer darauf achten, dass kein Spiritus in die offene Flamme geschüttet wird.
- Ballonmodelle, die mit brennendem, mit spiritusgetränktem Wattebausch fliegen, mit Bindfaden sichern und darauf achten, dass sich keine brennbaren Objekte in der näheren Umgebung befinden; ggf. Eimer mit Löschwasser bereit halten.
- Dafür sorgen, dass sich Schüler beim Arbeiten mit Hammer und Nägeln keine Verletzungen zufügen.
- Die Enden bei Bindendraht sind spitz und scharf und können zu Verletzungen führen.
- Dass beim Schneiden mit dem Styroporschneider keine Brandverletzungen entstehen.
- Beim Schneiden mit dem Teppichmesser besondere Vorsicht walten lassen, da Verletzungsgefahr besteht; Unterlagen verwenden.
- Bei Verwendung von Lösungsmittelhaltigem Kleber Räume gut lüften.
- Beim Werfen des Fluggleiters darauf achten, dass keine Personen in der Flugbahn stehen.
- Für Personen mit empfindlichen Atemwegen empfiehlt sich bei längerem Arbeiten mit dem Styroporschneider eine Absaugvorrichtung.

- Beim Starten der Wasserrakete ist darauf zu achten, dass
 - sie senkrecht hochsteigt und keine Personen in Flugrichtung stehen
 - sie beim Herunterfallen keine Personen verletzt und parkende Fahrzeuge beschädigt
 - sie nicht auf einer Straße herunterkommt, auf der sich Personen und Fahrzeuge befinden
- Ansonsten gelten die „Richtlinien für Sicherheit im naturwissenschaftlichen Unterricht“.

10. Anhang

Tabelle mit den Dichten verschiedener Stoffe

Stoff	Dichte in g / cm ³	Stoff	Dichte in g / dm ³
fest		gasförmig	
Styropor	0,015	Ammoniak	0,77
Balsaholz	0,1	Chlor	3,21
Kork	0,2 bis 0,4	Helium	0,18
Holz	0,4 bis 0,8	Kohlendioxid (CO ₂)	1,98
Butter	0,86	Luft	1,29
Eis (0 °C)	0,9	Sauerstoff	1,43
Gummi	0,9 bis 1,0	Stickstoff	1,25
Stearin	ca. 0,9	Wasserstoff	0,09
Bernstein	1,0 bis 1,1	Methan	0,72
Plexiglas	1,2	Propan	2,01
Kunststoff (PVC)	ca. 1,4		
Sand	ca. 1,5		
Beton	1,5 bis 2,4		
Kohlenstoff			
- Graphit	2,25		
- Diamant	3,52		
Glas	ca. 2,6		
Aluminium	2,70		
Granit	ca. 2,7		
Marmor	ca. 2,8		
Zink	7,13		
Zinn	7,28		
Eisen	7,87		
Stahl	7,8 bis 7,9		
Messing	ca. 8,5		
Nickel	8,90		
Kupfer	8,96		
Silber	10,5		
Blei	11,3		
Gold	19,3		
Platin	21,5		
Benzin	ca. 0,7		

flüssig

Alkohol (Ethanol)	0,79
Terpentinöl	0,86
Wasser (4 °C)	1,00
Milch	1,03
Salzwasser	1,03
Glycerin	1,26
Schwefelsäure, konz.	1,83
Quecksilber	15,55

Bauanleitung für Profilkörper (I)

Material

Styrodurplatte*, Stärke 6 – 8 cm, aus dem Baumarkt (Styrodur ist ein Hartschaum in den Farben grün und blau, der zur Kellerisolierung verwendet wird; einzelne Platten sind im Baustofffachhandel erhältlich), Gewindestange M5 (ca. 20 cm), 2 Flügelmutter für M 5, 6 Metallscheiben für M5, 4 Muttern M5, 1 Brettchen aus Holz oder Spanplatte (ca. 15 × 15 × 1,5 cm oder ähnlich), 2 Brettchen aus Holz oder Spanplatte (ca. 4 × 15 × 1 cm oder ähnlich), 6 kleinere Nägel oder Schrauben, Kunststoffkleber (geeignet für Styropor)

Werkzeuge

Kreissäge zum Schneiden der Brettchen, Styroporschneider oder Bandsäge oder Stichsäge oder Laubsäge oder langes Metallsägeblatt zum Ausschneiden des Profilkörpers, Metallsäge zum Schneiden der Gewindestange, Bohrmaschine mit Bohrern (Ø 3 mm und 4 mm), Hammer, Raspel, Feile, Schraubenzieher, verschiedenes Schleifpapier (auch sehr feines)

Bauanleitung (Variante 1)

- Quader aus Styrodur (ca. 12 cm breit, 24 cm lang und 7 cm hoch) aus einer Platte ausschneiden. Vgl. dazu auch Sicherheitshinweis (S. 65).
- Schablone des Profilkörpers auf den Styrodurquader aufkleben
- Der Profilkörper kann aus dem Quader mit Hilfe der Schablone und Bandsäge, Stichsäge, Styroporschneider bzw. Laubsäge herausgeschnitten werden; anschließend muss er Schleifpapier nachgearbeitet werden, bis er die richtige Form besitzt. Oberfläche sehr glatt schleifen! Beim Schleifen Profilkörper gut anfeuchten, damit Staub- und Krümelbildung vermieden wird.
- Den Profilkörper entsprechend Zeichnung möglichst parallel zur Oberseite durchbohren (Bohrer Ø 2 mm).
- In das Bohrloch Kleber hineindrücken und Gewindestange durch das Bohrloch schieben, so dass der Profilkörper mittig auf der Gewindestange sitzt; Gewindestange an den Enden gut verkleben und trocknen lassen.
- Profilkörper mittig mit zwei Metallscheiben, die von beiden Seiten mit Muttern gegen den Profilkörper geschraubt werden, fixieren.

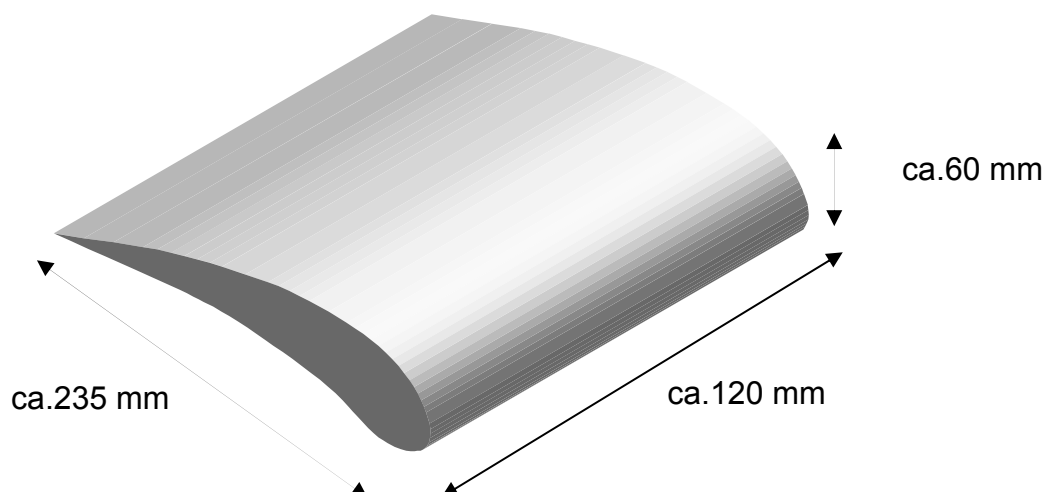
* An Stelle von Styrodur kann auch Styropor verwendet werden. Vorteilhaft bei diesem Material ist, dass es sehr einfach und preiswert zu beschaffen ist und sich genauso wie Styrodur bearbeiten lässt. Nachteilig ist, dass es bei der Bearbeitung der Oberfläche sehr bröselig ist und dass die Oberfläche nicht besonders glatt wird.

- Die beiden kleinen Brettchen zur Deckung bringen, mit Klebeband fixieren und ein Loch (Bohrer $\varnothing$ 5 mm) senkrecht, ca. 1 cm unterhalb der Kanten, durch die kleinen Brettchen bohren.
- Beide Brettchen mittig mit je 3 – 4 Nägeln bzw. Schrauben im rechten Winkel an dem große Brettchen befestigen.
- Gewindestange mit Profilkörper durch beide Löcher führen, an beiden Seiten außen eine Metallscheibe durchschieben.
- Flügelmuttern von beiden Seiten aufdrehen, bis der Profilkörper fixiert ist; mit 2 Muttern von der anderen Seite kontern.
- Um den Anstellwinkel des Profilkörpers zu verändern, Flügelschrauben etwas lockern, Profilkörper drehen und dann wieder Flügelschrauben anziehen; dies aber erst, wenn der Kleber getrocknet ist.

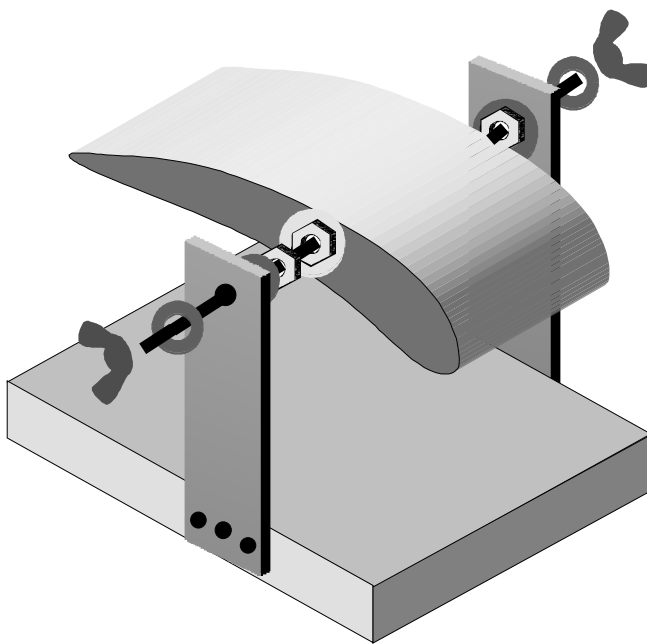
Bauanleitung (Variante 2)

- Variante 2 ist fast baugleich mit Variante 1. Der Unterschied besteht darin, dass der Profilkörper mit der Gewindestange verklebt wird, aber auf jeder Seite nur mit je einer Scheibe und einer Mutter zusätzlich fixiert wird. Der Profilkörper muss bei dieser Variante aber so breit sein wie das Holzbrettchen, damit er mit Hilfe der Flügelmuttern zwischen den beiden senkrechten Brettchen eingeklemmt werden kann.
An dem senkrechten Brettchen wird die Gewindestange auf der Innenseite ebenfalls mit einer Scheibe und einer Mutter zusätzlich befestigt.
- Vorteil von Variante 1 ist, dass der Profilkörper besser fixiert ist und besser gedreht werden kann.

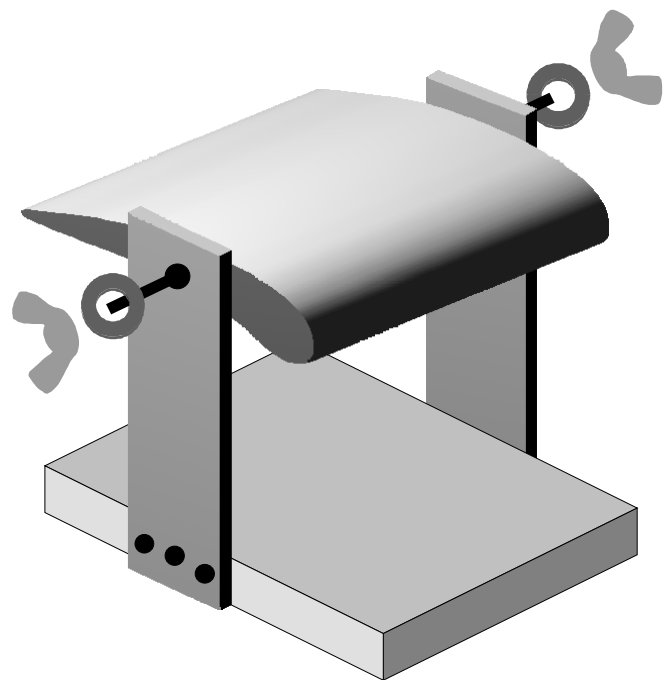
Profilkörper



Profilkörper mit Halterung



Variante 1



Variante 2

Bauanleitung für Profilkörper (II)

Material

Styrodurplatte^{*}, Stärke 6 – 8 cm, aus dem Baumarkt (Styrodur ist ein Hartschaum in den Farben grün und blau, der zur Kellerisolierung verwendet wird; einzelne Platten sind im Baustofffachhandel erhältlich), 1 Brettchen aus Holz oder Spanplatte (ca. 15 × 15 × 1 cm oder ähnlich), 2 Klammern, ca. 50 cm Schweißdraht (Ø 3 mm), 2 Wäscheklammern (klein oder normal), 25 cm Schweißdraht (Ø 2 mm), etwas Knetmasse bzw. Wachs, Kunststoffkleber (geeignet für Styropor)

Werkzeuge

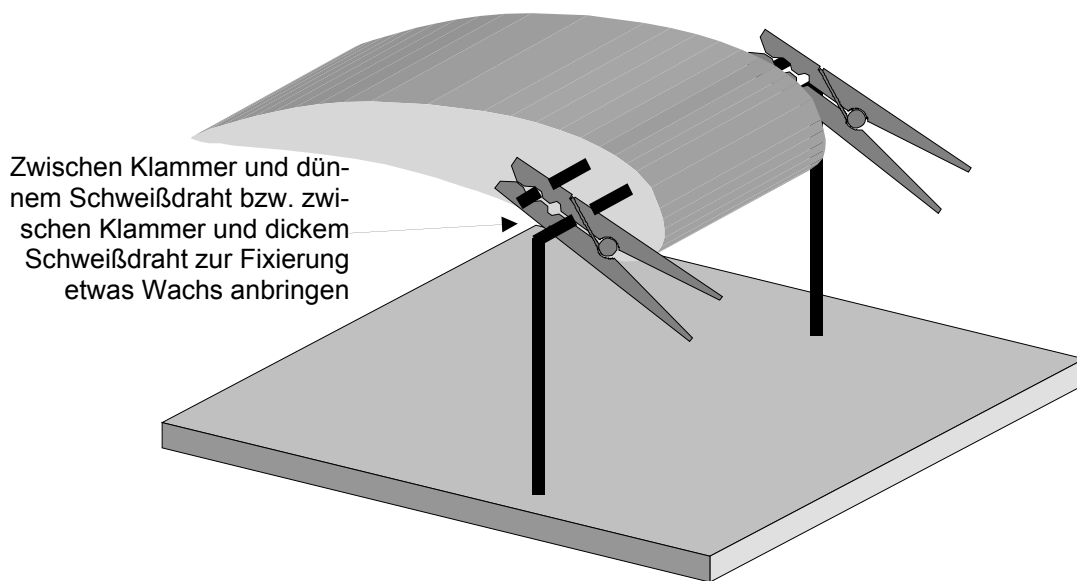
Kreissäge zum Schneiden der Brettchen, Styroporschneider oder Bandsäge oder Stichsäge oder Laubsäge oder langes Metallsägeblatt zum Ausschneiden des Profilkörpers, Bohrmaschine mit Bohrern (Ø 3 mm), Hammer, Raspel, Feile, verschiedenes Schleifpapier (auch sehr feines), Schraubstock

Bauanleitung

- Der Profilkörper wird wie in Bauanleitung A hergestellt. Vgl. dazu auch Sicherheitshinweis (S. 65).
- Der Schweißdraht wird durch den Profilkörper gesteckt und mittig fixiert.
- Der Schweißdraht wird mit Hilfe von Schraubstock und Hammer zu einem U-Profil geformt; das Profil kann auch mit einer guten Kombizange gebogen werden.

^{*} An Stelle von Styrodur kann auch Styropor verwendet werden. Vorteilhaft bei diesem Material ist, dass es sehr einfach und preiswert zu beschaffen ist und genauso wie Styrodur bearbeiten lässt. Nachteilig ist, dass es bei der Bearbeitung der Oberfläche sehr bröselig ist und dass die Oberfläche nicht besonders glatt wird.

- In den Profilkörper wird auf beiden Seiten der „Schweißdrahtachse“ ein Stück Schweißdraht ($\varnothing$ 2 mm) so weit hineingesteckt, dass es ca. 3 cm auf jeder Seite herausschaut.
- Der durchgeschobene Schweißdraht wird mit Kleber an dem Profil befestigt.
- In das Brettchen werden zwei Löcher ($\varnothing$ 3 mm) gebohrt, in die das U-Profil so hineingedrückt (geschlagen) wird, dass es fest sitzt.
- Der Profilkörper wird jetzt auf beiden Seiten mit den Klammern an Achse und Nägeln fixiert und kann dann, je nach Bedarf um die Mittelachse gedreht werden. Damit die Klammern besser an dem Draht und an den Nägeln haften, ist es vorteilhaft, zwischen Klammer und Draht bzw. zwischen Klammer und Nägel, etwas Knetmasse bzw. Wachs zur Fixierung anzubringen.



Schablone für Profilkörper

Der größere Profilkörper sollte aus Styropor geschnitten werden, während der kleinere aus Styrodur geschnitten werden kann.

Versuchs- Arbeitsseiten





Versuchs-Arbeitsblatt 1.1

Versuch 1

Versuchsthema

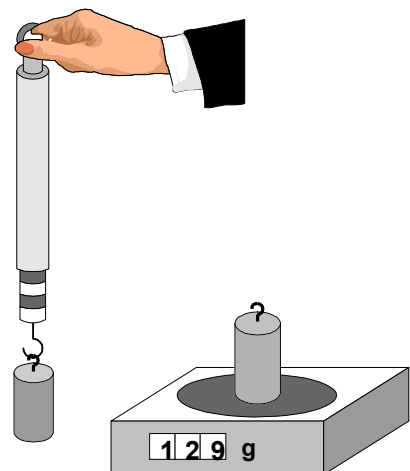
Arbeiten mit dem Kraftmesser.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Kraftmesser, Waage, verschiedene Massestücke

Versuchsdurchführung

- Hänge verschiedene Massestücke an den Kraftmesser, lies den Zahlenwert auf der Skala ab und trage die Zahlenwerte in die untenstehende Tabelle ein.
- Wiege die Massestücke mit der Waage und trage die Zahlenwerte in die untenstehende Tabelle ein.
- Beschreibe, was mit dem Kraftmesser geschieht, wenn die Massestücke leicht bzw. schwer sind.
- Beschreibe, welcher Zusammenhang zwischen den Zahlen auf der Skala des Kraftmessers und den Zahlenangaben der Waage besteht.



Versuchsbeobachtung

Körper	N	g
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		

c)

d)

Versuchserklärung



Versuch 2

Versuchsthema

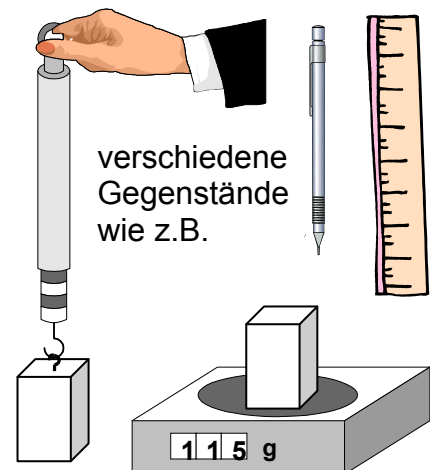
Arbeiten mit dem Kraftmesser.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Kraftmesser, Waage, verschiedene Gegenstände, Faden zum Befestigen der Gegenstände

Versuchsdurchführung

- Hänge verschiedene Gegenstände an den Kraftmesser, lies den Zahlenwert auf der Skala ab und trage die Zahlenwerte in die untenstehende Tabelle ein.
- Wiege die Gegenstände mit der Waage und trage die Zahlenwerte in die untenstehende Tabelle ein.
- Beschreibe, was mit dem Kraftmesser geschieht, wenn die Gegenstände leicht bzw. schwer sind.
- Beschreibe, welcher Zusammenhang zwischen den Zahlen auf der Skala des Kraftmessers und den Zahlenangaben der Waage besteht.



Versuchsbeobachtung

Gegenstand	N	g

c)

d)

Versuchserklärung



Versuch 3

Versuchsthema

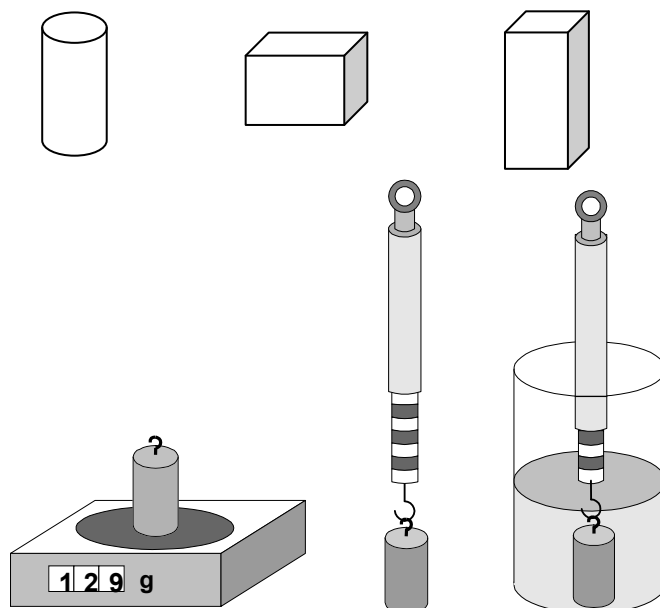
Der Auftrieb – wie Körper in Wasser ihr Gewicht verändern.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Kraftmesser, verschiedene Massestücke, eventuell verschiedene Körper bzw. Gegenstände (nicht zu klein), Faden zum Befestigen der Gegenstände, mit Wasser gefülltes Becherglas

Versuchsdurchführung

- Stelle die verschiedenen Körper bzw. Gegenstände auf die Waage, stelle ihre Masse fest und trage sie in die untenstehende Tabelle ein.
- Hänge verschiedene Körper bzw. Gegenstände an den Kraftmesser, lies die Zahlenwerte auf der Skala ab und trage sie in die untenstehende Tabelle ein.
- Tauche die Körper bzw. Gegenstände in das mit Wasser gefüllte Becherglas, lies die Zahlenwerte auf der Skala ab und trage sie in die untenstehende Tabelle ein.
- Beschreibe, was geschieht, wenn ein Körper bzw. Gegenstand in das Wasser des Becherglases eintaucht.



Versuchsbeobachtung

Körper bzw. Gegenstand	g	N	N in Wasser
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			

c)

Versuchserklärung



Versuch 4

Versuchsthema

Wovon der Auftrieb eines Körpers in Wasser abhängt.

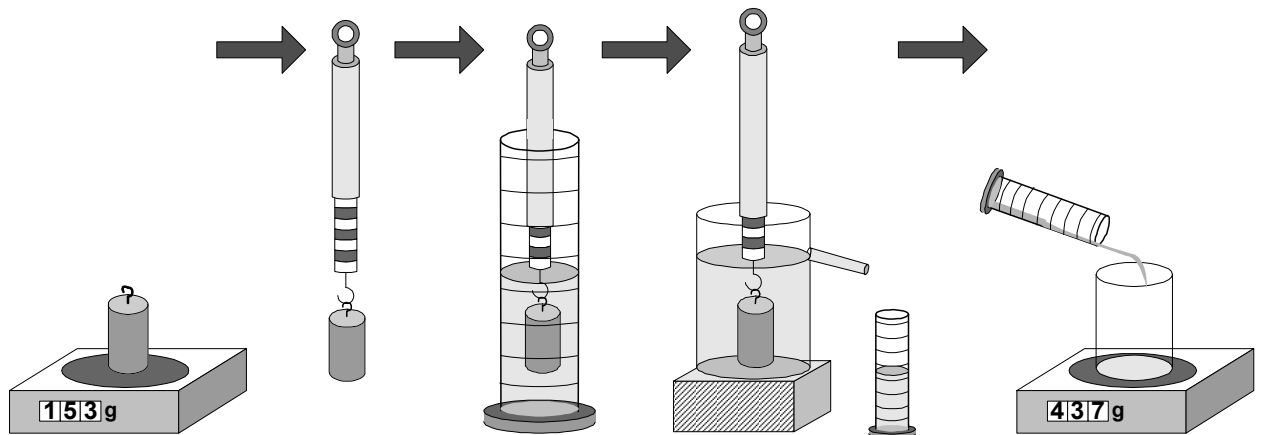
Versuchsaufbau (Materialliste)

Kraftmesser, Waage, verschiedene Massestücke (eventuell verschiedene Gegenstände), die nicht in Wasser schwimmen, Faden zum Befestigen der Gegenstände, 2 Messzylinder, Becherglas, Überlaufgefäß, Rührstab, einige Tropfen Spülmittel, Unterlegbrettchen

Versuchsdurchführung

Trage bei den folgenden Untersuchungen alle Messergebnisse in die entsprechenden Spalten der Tabelle ein.

- Bestimme die Masse eines Körpers (in g) mit Hilfe der Waage.
- Bestimme das Gewicht eines Körpers (in N) mit Hilfe eines Kraftmessers.
- Bestimme das Gewicht des Körpers in Wasser.
- Berechne den Unterschied (Differenz) der beiden Gewichte.
- Ermittle mit Hilfe eines Überlaufgefäßes das Volumen (die cm^3) des Wassers, das der Körper verdrängt (gib zuvor einige Tropfen Spülmittel in das Wasser und verrühre sie). Stelle das Gefäß auf Unterlegbrettchen.
- Ermittle mit Hilfe der Waage die Masse des verdrängten Wassers.



Versuchsbeobachtung

Körper	g	N	N in W.	N Diff.	cm^3 verdrängtes Wasser	g verdrängtes Wasser	N verdrängtes Wasser
1.							
2.							
3.							
4.							

Versuchserklärung



Versuch 5

Versuchsthema

Wie der Auftrieb eines Körpers in Wasser ist, der schwimmt.

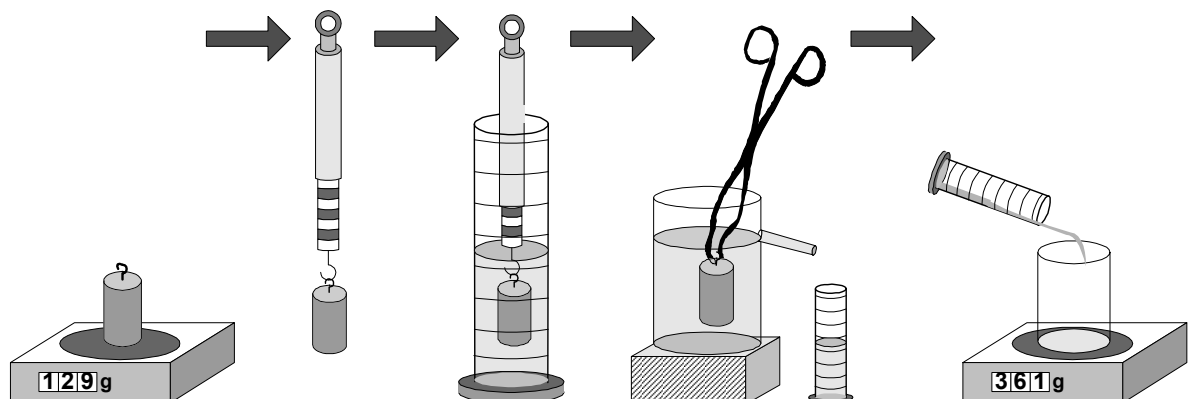
Versuchsaufbau (Materialliste)

Kraftmesser, evtl. verschiedene Körper oder Gegenstände aus Holz oder Kunststoff, die schwimmen, Kraftmesser, Waage, Becherglas, Überlaufgefäß und/oder Messzylinder, Tiegellzange, Unterlegbrettchen

Versuchsdurchführung

Trage bei den folgenden Untersuchungen alle Messergebnisse in die entsprechenden Spalten der Tabelle ein.

- Bestimme die Masse eines Körpers (in g) mit Hilfe der Waage.
- Bestimme das Gewicht eines Körpers (in N) mit Hilfe eines Kraftmessers.
- Bestimme das Gewicht des Körpers in Wasser.
- Berechne den Unterschied (Differenz) der beiden Gewichte.
- Ermittle mit Hilfe eines Überlaufgefäßes das Volumen (die cm^3) des Wassers, das der schwimmende Körper verdrängt (gib zuvor einige Tropfen Spülmittel in das Wasser und verrühre sie); stelle das Gefäß auf Unterlegbrettchen.
- Ermittle mit Hilfe der Waage die Masse des verdrängten Wassers.



Versuchsbeobachtung

Körper	g	N	N in W.	N Diff.	cm^3 verdrängtes Wasser	g verdrängtes Wasser	N verdrängtes Wasser
1.							
2.							
3.							
4.							

Versuchserklärung



Versuch 6

Versuchsthema

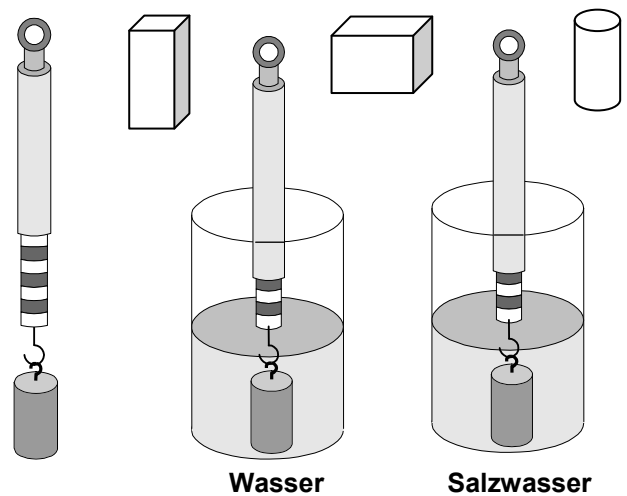
Der Auftrieb von Körpern in Salzwasser.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Kraftmesser, verschiedene Körper (von Versuch 4), Faden zum Befestigen der Körper, Becherglas, Rührstab, Salz

Versuchsdurchführung

- Verrühre in 150 ml Wasser ca. 54 g Salz und warte, bis es sich aufgelöst hat.
- Trage die Gewichte der Körper und ihre Gewichte in Wasser in die untenstehende Tabelle ein. Verwende dabei die Ergebnisse von Versuch 3.
- Tauche die Körper in das mit Salzwasser gefüllte Becherglas, lies die Zahlenwerte auf der Skala ab und trage sie in die untenstehende Tabelle ein.
- Beschreibe den Unterschied im Auftriebsverhalten der Körper in Wasser und Salzwasser.



Versuchsbeobachtung

Körper bzw. Gegenstand	N	N in Wasser	N in Salz- wasser
1.			
2.			
3.			
4.			

d)

Versuchserklärung



Versuch 7

Versuchsthema

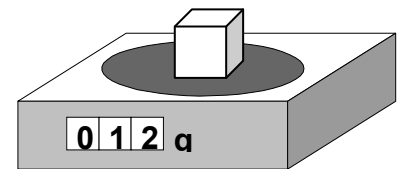
Die Dichte verschiedener Stoffe – wie das Gewicht eines Körpers von dem Stoff abhängt, aus dem er besteht.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Verschiedene Dichtewürfel, Waage, Lineal

Versuchsdurchführung

- Miss die Kantenlängen der Dichtewürfel aus.
- Wiege die Dichtewürfel.



Versuchsbeobachtung

a)

b)

Material	Gewicht in g

Versuchserklärung



Versuch 1

Versuchsthema

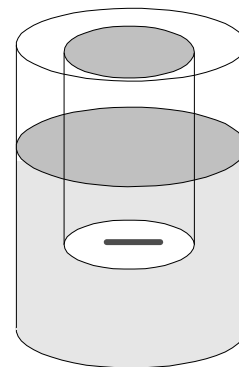
Wie man zeigen kann, dass Luft ein Stoff ist.

Versuchsaufbau (Materialliste)

großes Becherglas, kleines Becherglas, kleines Hölzchen oder Papierschnipsel

Versuchsdurchführung

- Fülle das große Becherglas zur Hälfte mit Wasser und lege das Hölzchen auf die Wasseroberfläche.
- Stülpe das kleine Becherglas über das Hölzchen und drücke es unter Wasser.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 2

Versuchsthema

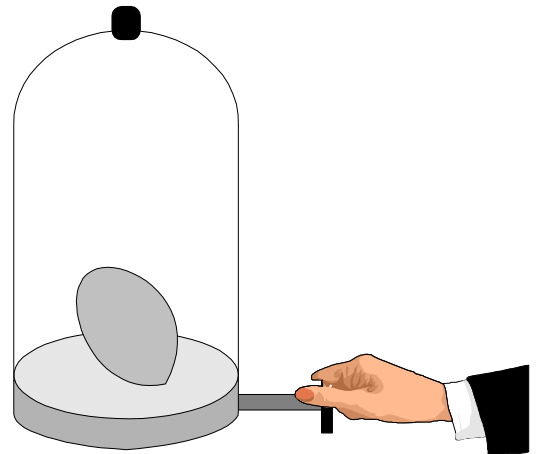
Wie man den Luftdruck, der auf der Erde herrscht, sichtbar machen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Kunststoffrezipient, Luftballon

Versuchsdurchführung

- Puste einen Luftballon nicht allzu stark auf.
- Lege den Luftballon unter den Rezipienten.
- Pumpe die Luft aus dem Rezipienten heraus und erzeuge so einen starken Unterdruck bzw. ein Vakuum.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 3

Versuchsthema

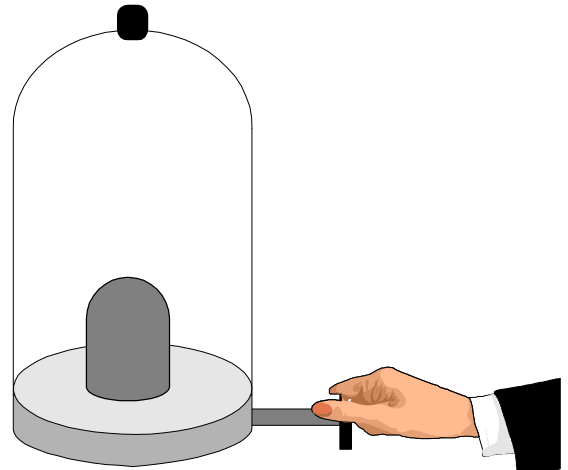
Wie man den Luftdruck, der auf der Erde herrscht, sichtbar machen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Kunststoffrezipient, Negerkuss (Schaumkuss)

Versuchsdurchführung

- Lege einen Schaumkuss unter den Rezipienten.
- Pumpe die Luft aus dem Rezipienten heraus und erzeuge so einen starken Unterdruck bzw. ein Vakuum.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 1

Versuchsthema

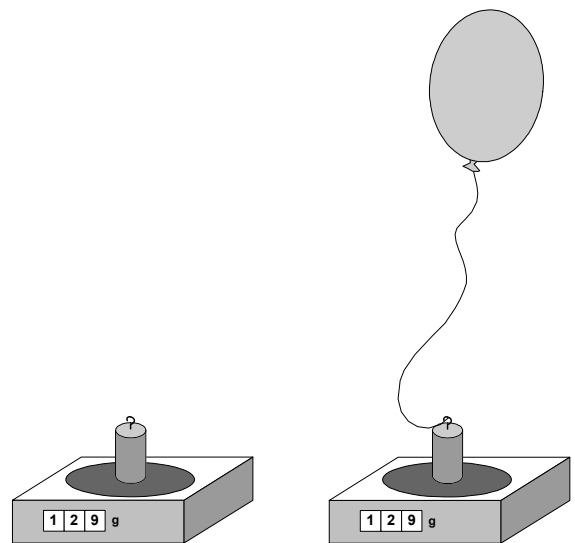
Auftrieb von einem wasserstoffgefüllten Ballon in Luft.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Mit Wasserstoff oder Helium gefüllter Ballon, Bindfaden, Gewichtsstück, Waage

Versuchsdurchführung

- Ermittle die Masse eines Gewichtsstückes mit Hilfe der Waage und notiere, wie viel Gramm es wiegt.
- Befestige einen mit Wasserstoff oder Helium gefüllten Luftballon mit Hilfe eines Fadens an dem Gewichtsstück und stelle es erneut auf die Waage.
- Lies ab, was die Waage anzeigt.



Versuchsbeobachtung

a)

c)

Versuchserklärung



Versuch 2

Versuchsthema

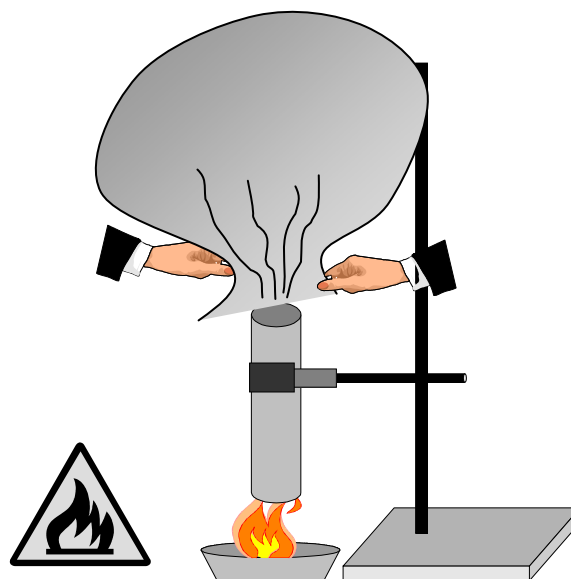
Auftrieb von einem mit heißem Gas gefüllten Müllbeutel in Luft.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Müllbeutel*, Stativ, Doppelmuffe, Stativklemme, Metallrohr, Tiegelschale, feuerfeste Unterlage, Spiritus oder Esbit, Streichhölzer

Versuchsdurchführung

- Baue den folgenden Versuch mit Hilfe von Stativ, Doppelmuffe, Stativklemme und Rohr auf.
- Entzünde den unter dem Rohr in einer Tiegelschale befindlichen Spiritus bzw. das Esbit vorsichtig mit einem Streichholz.
- Halte den Beutel so über das Rohr, dass er sich mit heißem Gas füllen kann. Achte darauf, dass du mit dem Beutel nicht in die Nähe der Flamme kommst!
- Wenn der Beutel sich mit heißem Gas gefüllt hat und prall ist, lass ihn los.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung

* Nur Müllbeutel nehmen, die für die Papierkörbe in den Klassenräumen verwendet werden (diese sind besonders dünn und daher besonders leicht)



Versuch 3

Versuchsthema

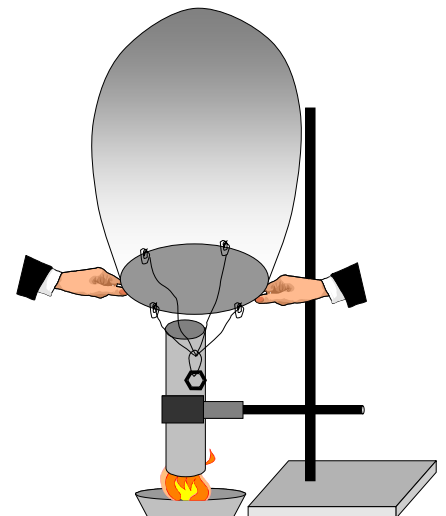
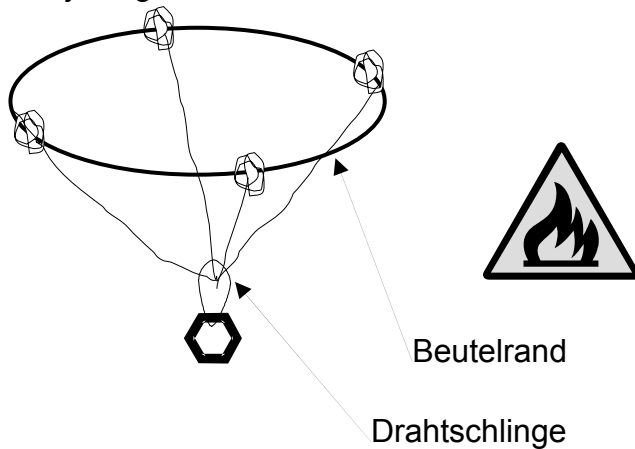
Auftrieb von einem mit heißem Gas gefüllten Müllbeutel in Luft.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Müllbeutel, Stativ, Doppelmuffe, Stativklemme, Metallrohr, Tiegelschale, feuerfeste Unterlage, Kombizange, etwas Bindendraht, kleine Schraubenmutter, Spiritus oder Esbit, Streichhölzer

Versuchsdurchführung

- Entfalte den Müllbeutel voll, streiche ihn glatt und mache vier Knoten im gleichen Abstand in den unteren Rand.
- Befestige an diese Knoten vier Zwirnsfäden von ca. 40 cm Länge.
- Verknote die Enden der Zwirnsfäden so, dass der Knoten mittig über der Öffnung des Beutels positioniert ist.
- Schneide mit der Kombizange ein ca. 5 cm langes Stück Draht ab und schiebe es durch die Schraubenmutter.
- Ziehe den Draht mit der Schraubenmutter über den Knoten und verdrille ihn zu einer Schlinge.
- Verfahre jetzt genau wie in Versuch 2.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 4

Versuchsthema

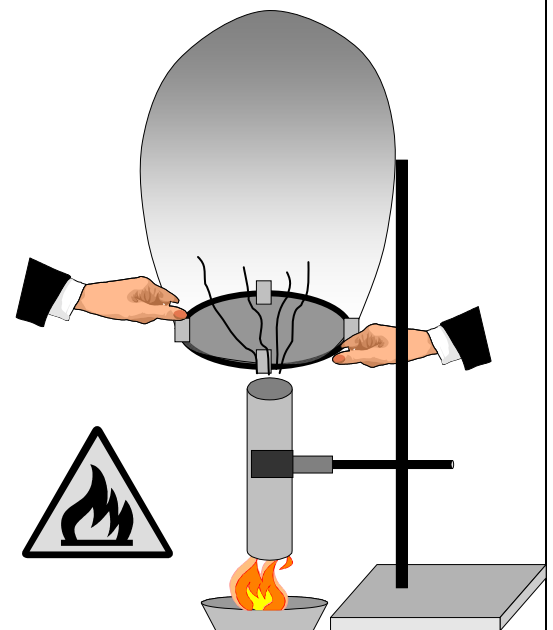
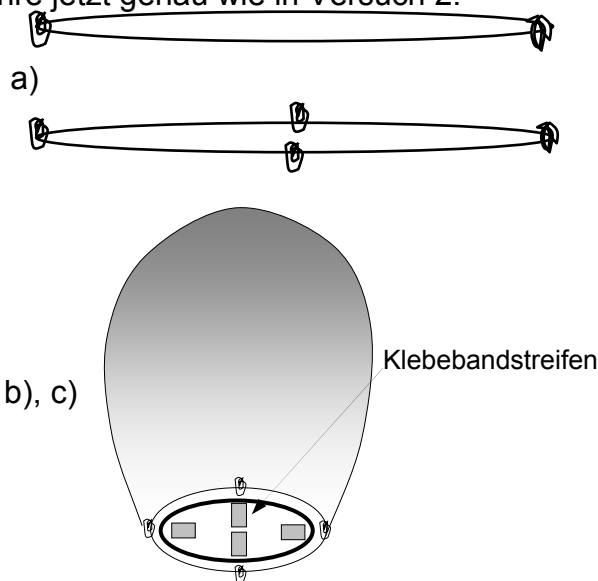
Auftrieb von einem mit heißem Gas gefüllten Müllbeutel in Luft.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Müllbeutel, Stativ, Doppelmuffe, Stativklemme, Metallrohr, Tiegelschale, feuerfeste Unterlage, Kombizange, 1 m Blumenbindedraht, Spiritus oder Esbit, Streichhölzer, Klebeband

Versuchsdurchführung

- Der Müllbeutel wird voll entfaltet, glattgestrichen und es werden in den unteren Rand vier Knoten in gleichem Abstand gemacht. Dies sorgt dafür, dass der Rand des Beutels etwas stabilisiert wird (vgl. Versuch 5a).
- Fertige aus ca. 90 cm Bindedraht einen Ring mit ca. 30 cm Durchmesser an, indem du die Drahtenden übereinander legst und mit einer Kombizange verdreht.
- Schiebe diesen Drahtring einige Zentimeter in die Öffnung des Beutels und schlage den Rand nach innen um den Drahtring. Befestige an den Knoten, die für Stabilität sorgen, kurze Klebebandstreifen und verklebe sie mit der Innenseite des Beutels; eventuell kann der Rand an weiteren Punkten verklebt werden.
- Verfahre jetzt genau wie in Versuch 2.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 5

Versuchsthema

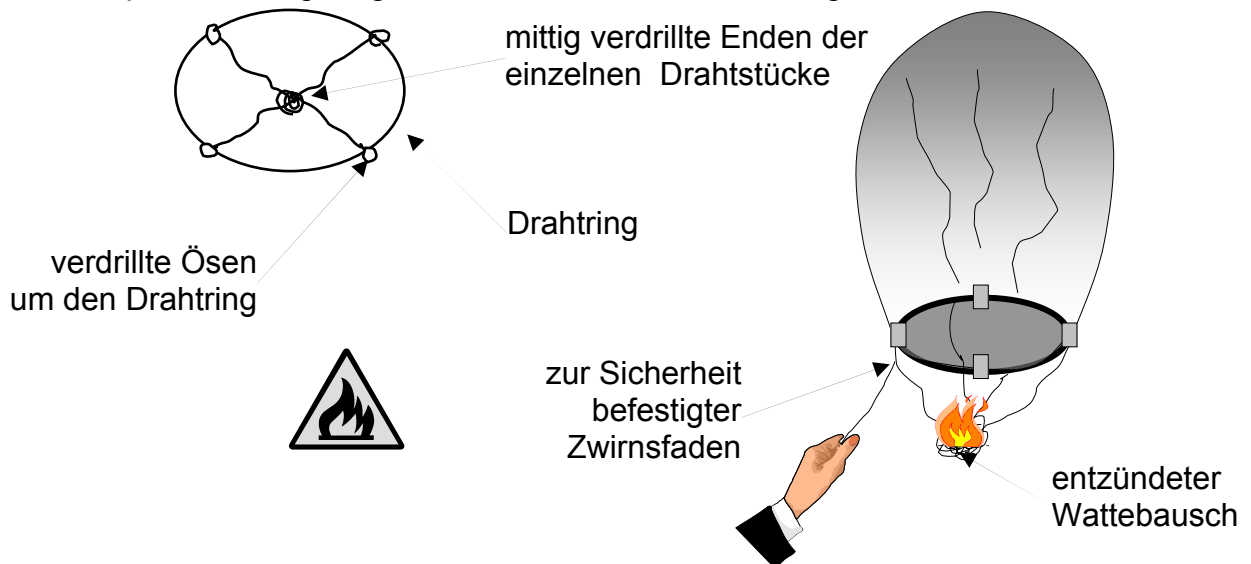
Auftrieb von einem mit heißem Gas gefüllten Müllbeutel in Luft.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Müllbeutel, Stativ, Doppelmuffe, Stativklemme, Metallrohr, Tiegelschale, feuerfeste Unterlage, Kombizange, 2 m Blumenbindedraht, Spiritus oder Esbit, Streichhölzer, Klebeband

Versuchsdurchführung

- Verfahre wie in Versuch 4 a – c.
- Schneide aus dem restlichen Bindedraht 4 Stücke von ca. 20 – 25 cm Länge und befestige sie in gleichen Abständen an dem Drahring (der Draht wird durch den Kunststoff des Beutels gestoßen und mit einer Kombizange zu einer kleinen Schlinge verdreht).
Vorsicht! An den spitzen Enden der Bindedrahtstücke kann man sich verletzen.
- Verdrehe die freien Enden so miteinander, dass der Kreuzungspunkt über dem Ringmittelpunkt liegt.
- Befestige an einem der Drahtstücke einen langen Zwirnsfaden (10 m oder länger) aus Sicherheitsgründen.
- Befestige an den verdrehten freien Enden einen Wattebausch und tränke ihn mit etwas Spiritus (vorsichtig dosieren!). Stelle die Spiritusflasche in größerem Abstand beiseite.
- Lass den Beutel von einem Mitschüler hochhalten, während du mit einem Streichholz den spiritusgetränkten Wattebausch entzündest. Vorsicht Verbrennungsgefahr! Wenn der Beutel prall ist und genügend Auftrieb besitzt, wird er losgelassen.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 1

Versuchsthema

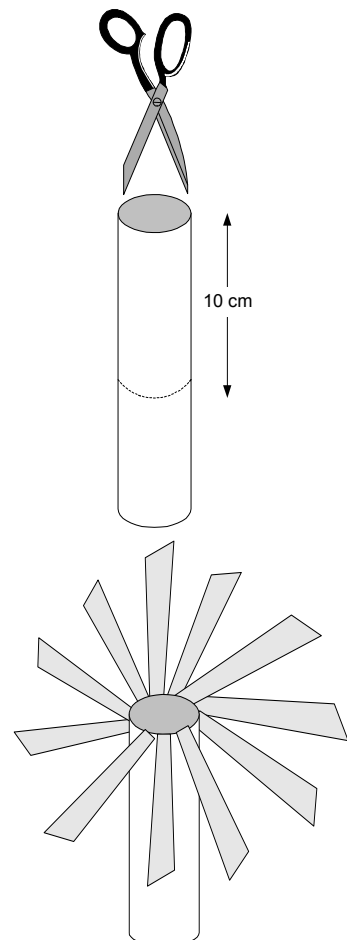
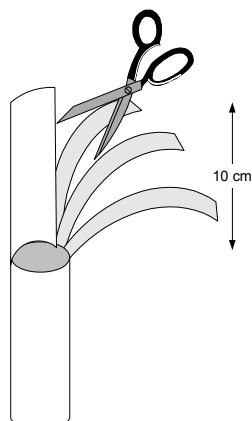
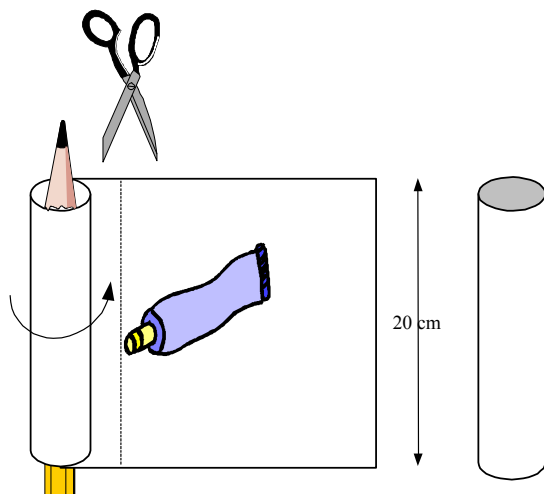
Luft bremst fallende Körper.

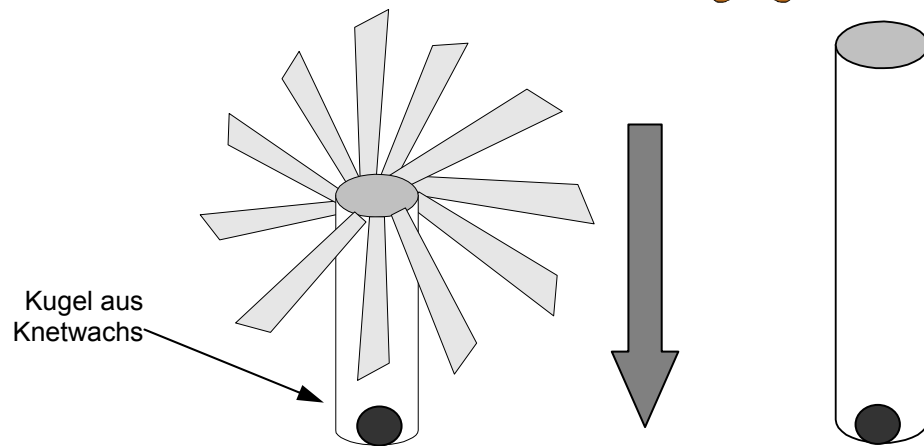
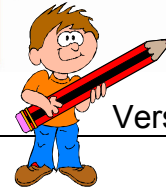
Versuchsaufbau (Materialliste)

Blatt Schreibpapier, alternativ ein Kunststofftrinkhalm mit großem Durchmesser, langer Bleistift, spitze Schere, Alleskleber, evtl. etwas Knetwachs

Versuchsdurchführung

- Um den Bleistift wird die lange Seite des Blattes zu einer Röhre gedreht und der Rand mit Klebstoff am übrigen Blatt fixiert.
- Nach Trocknung des Klebstoffs wird die entstandene Papierröhre mit der Schere abgetrennt.
- Aus dem restlichen Papierstück wird auf diese Weise eine zweite Röhre hergestellt.
- Die Mitte der ersten Röhre wird markiert und die obere Hälfte der Röhre wird mit der Schere vom Ende her in möglichst viele Schmale Streifen geschnitten.
- Die entstandenen Papierstreifen werden anschließend einzeln von der Mitte aus waagrecht umgeknickt.
- Beide Röhren – die bearbeitete und die unbearbeitete – werden aus erhöhter Position (Stuhl, Tisch, Leiter oder Schultreppenhaus) fallen gelassen. Ihr Fallen wird beobachtet und es wird evtl. die Fallzeit gestoppt.





Versuchsbeobachtung

f)

Versuchserklärung



Versuch 2

Versuchsthema

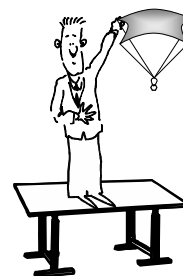
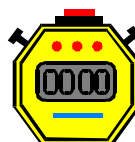
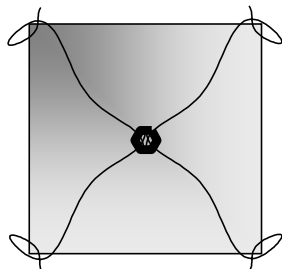
Luft bremst fallende Körper.

Versuchsaufbau (Materialliste)

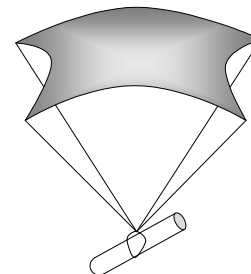
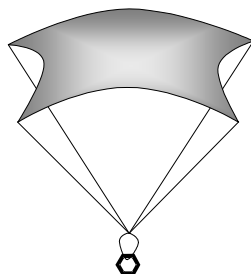
Serviette (dünn, einlagig, 30×30 cm) oder Kunststoffolie von Mülleimertüten (ca. 40×40 cm), ca. 1,50 m Nähgarn, Schere, Schraubenmutter (ca. 5 – 8 g), Reagenzglas (alt bzw. defekt), Stoppuhr

Versuchsdurchführung

- Stelle dich auf einen Stuhl und lass die Schraubenmutter (Reagenzglas) aus ca. 2,50 m Höhe fallen. Lass die Fallzeit von einem Mitschüler stoppen.
- Nimm die Serviette und knote um jede Ecke einen Faden (ca. 25 bis 30 cm). Ziehe die Fäden in der Mitte durch die Mutter und verknote sie so, dass der Knoten genau mittig ist.
- Befestige anschließend die Schraubenmutter mit Hilfe einer Schlinge an den vier verknöteten Fäden.



- Lass die Serviette aus der gleichen Höhe wie bei Versuch a) fallen. Lass die Fallzeit von einem Mitschüler stoppen.



- Eine Serviette wird zusammen mit der Schraubenmutter (Reagenzglas) zusammengeknäuel und fallen gelassen. Lass die Fallzeit von einem Mitschüler stoppen.

Versuchsbeobachtung

a)

d)

e)

Versuchserklärung



Versuch 1

Versuchsthema

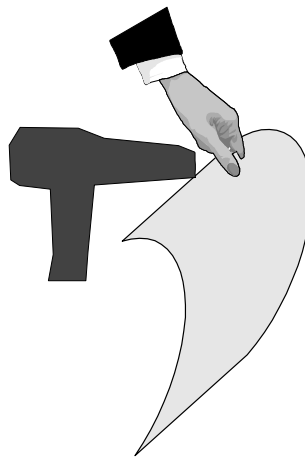
Wie man durch schnell bewegte Luft Überdruck und Unterdruck erzeugen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Blatt Papier (DIN A4), Föhn

Versuchsdurchführung

- Halte ein Blatt Papier mit der Hand fest und lasse es herunterhängen.
- Lasse den Luftstrom eines Föhns waagerecht darüber strömen.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 2

Versuchsthema

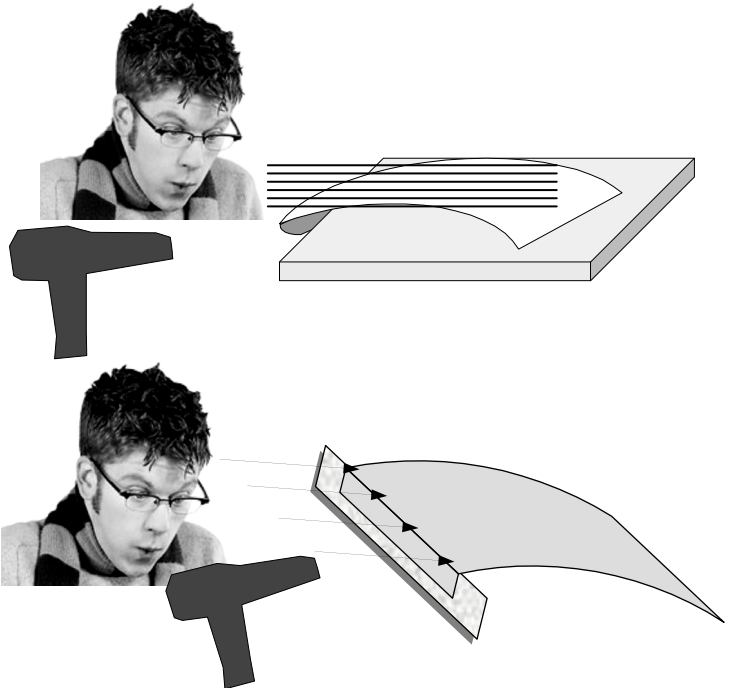
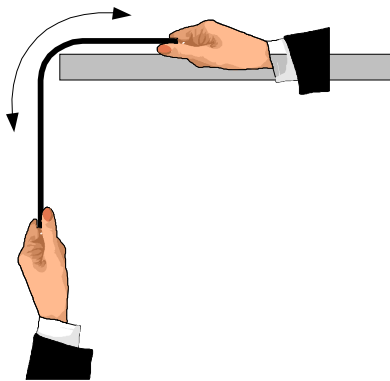
Wie man durch schnell bewegte Luft Überdruck und Unterdruck erzeugen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Blatt Papier (DIN A4), Föhn, Lineal

Versuchsdurchführung

- Ziehe ein Blatt Papier so über eine Tischkante, so dass es anschließend leicht gewölbt ist.
- Lege das Blatt auf den Tisch und presse das eine Ende gegen die Tischkante.
- Puste waagerecht über das Blatt hinweg.
- Leite den Luftstrom eines Föhns waagerecht über das Blatt hinweg.
- Knicke das Blatt über einem Lineal und verfahre wie in c) und d).



Versuchsbeobachtung

c)

d)

e)

Versuchserklärung



Versuch 3

Versuchsthema

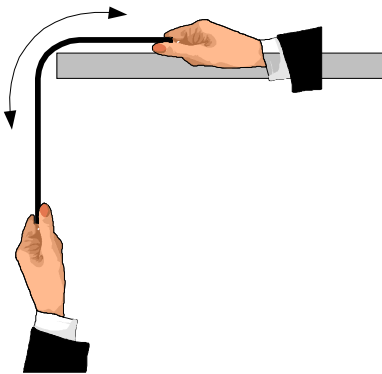
Wie man durch schnell bewegte Luft Überdruck und Unterdruck erzeugen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

2 Blätter Papier (DIN A4), Föhn

Versuchsdurchführung

- Ziehe beide Blätter Papier so über eine Tischkante, dass sie anschließend leicht gewölbt sind.
- Halte beide Blätter parallel im Abstand von 5 – 10 cm nebeneinander.
- Puste kräftig in den Zwischenraum.
- Leite den Luftstrom eines Föhns mit Hilfe eines Klassenkameraden zwischen beiden Blättern hindurch.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 4

Versuchsthema

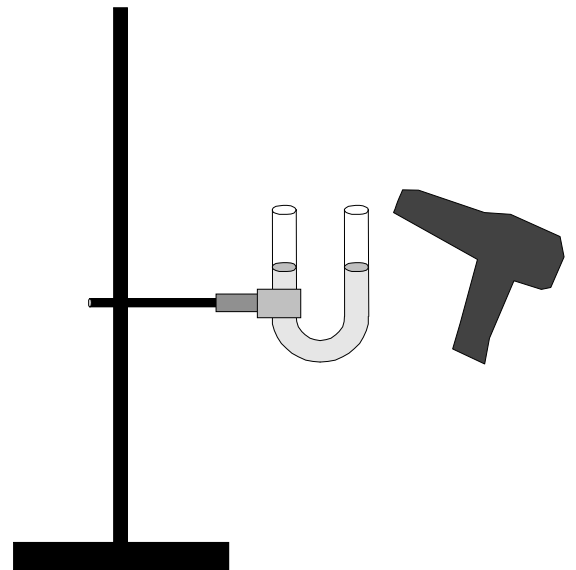
Wie man durch schnell bewegte Luft Überdruck und Unterdruck erzeugen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Stativ, Stativklemme, Doppelmuffe, U-Rohr, Föhn

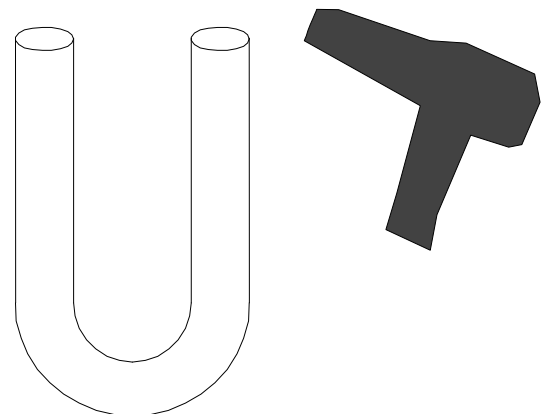
Versuchsdurchführung

- Baue das Stativ auf und spanne das U-Rohr ein.
- Fülle das U-Rohr etwa bis auf halbe Höhe mit Wasser.
- Leite den Luftstrom des Föhns schräge von unten über die Öffnung des U-Rohrs. Schreibe und zeichne deine Beobachtung auf.



Versuchsbeobachtung

c)



Versuchserklärung



Versuch 5

Versuchsthema

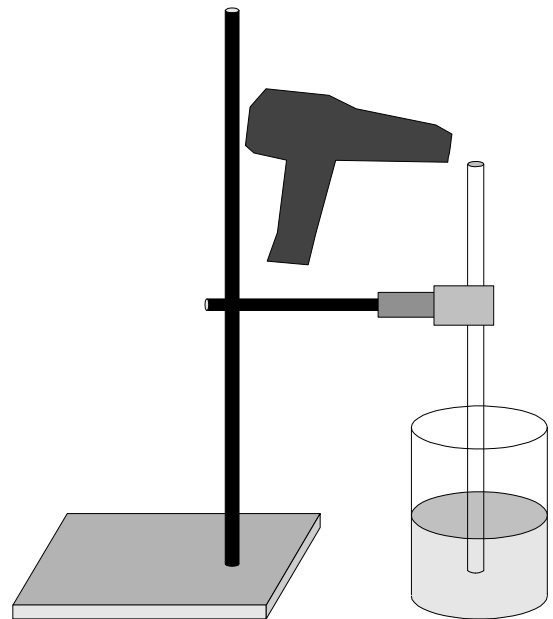
Wie man durch schnell bewegte Luft Überdruck und Unterdruck erzeugen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Stativ, Stativklemme, Doppelmuffe, Becherglas, Glasrohr ($\varnothing$ 5 mm oder mehr), Föhn

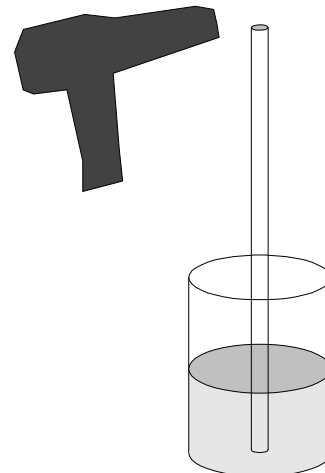
Versuchsdurchführung

- Baue das Stativ auf und spanne das Glasrohr so ein, dass es einige cm tief in ein mit Wasser gefülltes Becherglas eintaucht.
- Leite den Luftstrom eines Föhns über die Öffnung des Glasrohres. Schreibe und zeichne deine Beobachtung auf.



Versuchsbeobachtung

b)



Versuchserklärung



Versuch 6

Versuchsthema

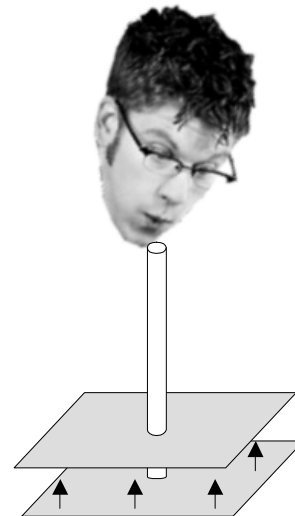
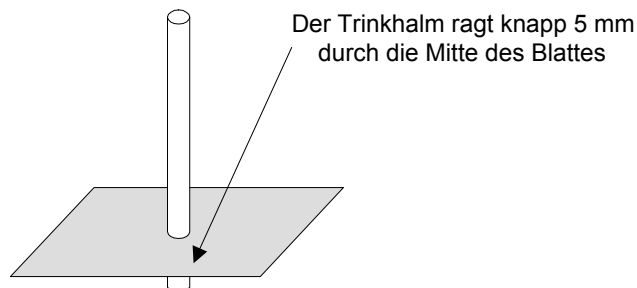
Wie man durch schnell bewegte Luft Überdruck und Unterdruck erzeugen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Blatt Papier (DIN A4), Trinkhalm, Schere, Kugelschreiber, Klebeband

Versuchsdurchführung

- Halbiere das Blatt Papier.
- Stich in die Mitte mit einer Kugelschreiberspitze ein Loch, dessen Durchmesser kleiner ist als der des Trinkhalms.
- Schiebe durch dieses Loch den Trinkhalm, so dass er auf der Rückseite des Blattes ca. 5 mm herausragt.
- Sollte der Trinkhalm sehr locker sitzen, kann er mit zwei Streifen Klebeband befestigt werden.
- Das Blatt mit dem Trinkhalm wird mittig über das andere Blatt gelegt.
- Jetzt wird kräftig in den Trinkhalm geblasen, wobei er gleichzeitig nach oben gezogen wird.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 7

Versuchsthema

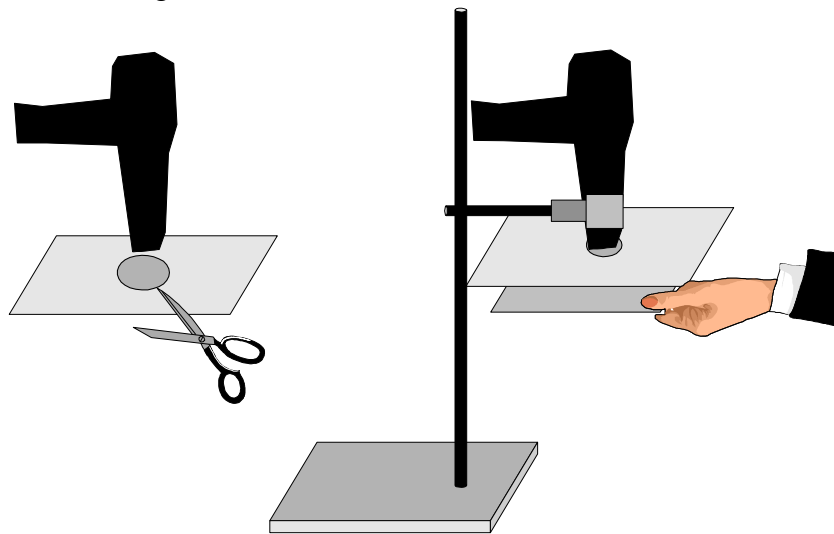
Wie man durch schnell bewegte Luft Überdruck und Unterdruck erzeugen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Föhn, Stativ, Stativmuffe, Stativklemme, Schere, ein Quadrat (ca. 20 cm × 20 cm oder auch größer) aus fester, glatter Pappe, Blätter bzw. Platten aus Papier, Pappkarton, Styropor (1 – 2 cm dick), Zeichenkarton, evtl. aus sehr dünnem Kunststoff (alle ca. 20 cm × 20 cm oder auch größer), Kreppband

Versuchsdurchführung

- Schneide ein Pappquadrat ca. 20 × 20 cm
- Zeichne die Diagonalen, um den Mittelpunkt zu ermitteln.
- Drücke die Mündung des Föhns mittig auf die Pappe und zeichne einen Kreis darum.
- Schneide den Kreis aus.
- Baue den Versuch nach der untenstehenden Abbildung auf.
- Drücke die Öffnung des Föhns durch so durch das Loch in der Pappe, dass sie ca. 5 mm herausragt. Befestige die Pappe eventuell mit Klebeband an dem Föhn, so dass er fest mit der Pappe verbunden ist.
- Schalte den Föhn auf die höchste Stufe und nähere die andere Pappe (Blatt Papier, Platte) langsam der Mündung des Föhns.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 8

Versuchsthema

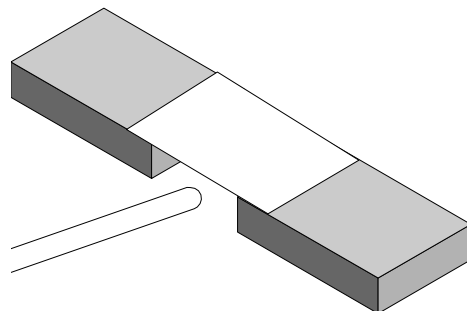
Wie man durch schnell bewegte Luft Überdruck und Unterdruck erzeugen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Trinkhalm, Blatt Papier (DIN A4), 2 Bücher ca. 5 cm dick (oder mehrere dünne Bücher) oder entsprechende Brettchen

Versuchsdurchführung

- Lege zwei Bücher im Abstand von ca. 10 cm nebeneinander.
- Lege über die beiden Bücher mittig ein Blatt Papier.
- Blase kräftig mit dem Trinkhalm in den Zwischenraum.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 9

Versuchsthema

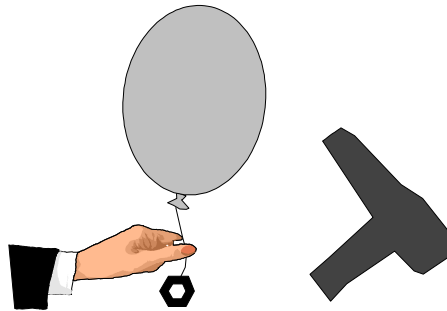
Wie man durch schnell bewegte Luft Überdruck und Unterdruck erzeugen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

Luftballon, Zwirnsfaden ca. 30 cm, Gegenstand von ca. 10 g Masse (großer Nagel, Schraubenmutter oder Ähnliches), Föhn

Versuchsdurchführung

- Puste einen Luftballon auf und verknote ihn.
- Verknote das eine Ende des Zwirnsfadens mit dem Gegenstand.
- Verknote das andere Ende des Fadens mit dem Ballon.
- Halte den Ballon mit der einen Hand so hoch wie möglich.
- Blase ihn mit dem Föhn, den du in der anderen Hand hältst, schräge von unten an.
- Beschreib genau, was passiert, wenn der Ballon schräge von unten angeblasen wird.
- Zeichne den Ballon mit dem Föhn und trage die genauen Druckverhältnisse in deine Zeichnung ein



Versuchsbeobachtung

f)

g)

Versuchserklärung



Versuch 10

Versuchsthema

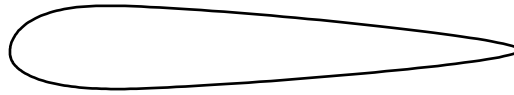
Wie man durch schnell bewegte Luft Überdruck und Unterdruck erzeugen kann.

Versuchsaufbau (Materialliste)

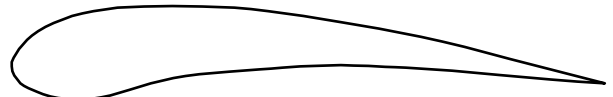
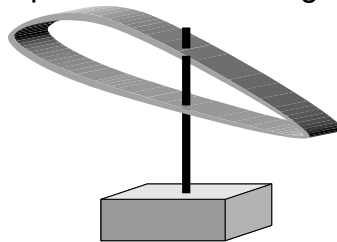
Waage, Föhn, Holzbrettchen, durch das mittig ein Nagel (ca. 10 cm lang) mit vierkantigem Profil geschlagen wurde, rechteckiger Streifen aus Zeichenkarton (ca. 30 × 10 cm), Tesafilm, Kleber (Uhu, Pattex oder andere)

Versuchsdurchführung

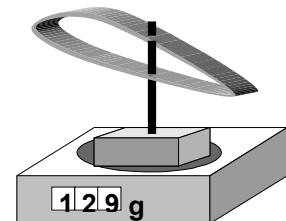
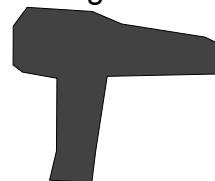
- a) Klebe den Kartonstreifen mit drei Streifen Tesafilm an beiden Enden zusammen, so dass du etwa das folgende Profil erhältst.



- b) Bohre das Kartonprofil durch den Nagel und versuche anschließend, das folgende Profil herzustellen.



- c) Verklebe die Stellen, wo der Nagel den Karton durchstoßen hat, und warte, bis der Klebstoff getrocknet ist.
- d) Stelle das Brettchen mit dem Profil auf eine Waage und blase es mit dem Föhn an und beobachte die Anzeige der Waage.



Versuchsbeobachtung

d)

Versuchserklärung



Versuch 1

Versuchsthema

Warum eine Rakete fliegt

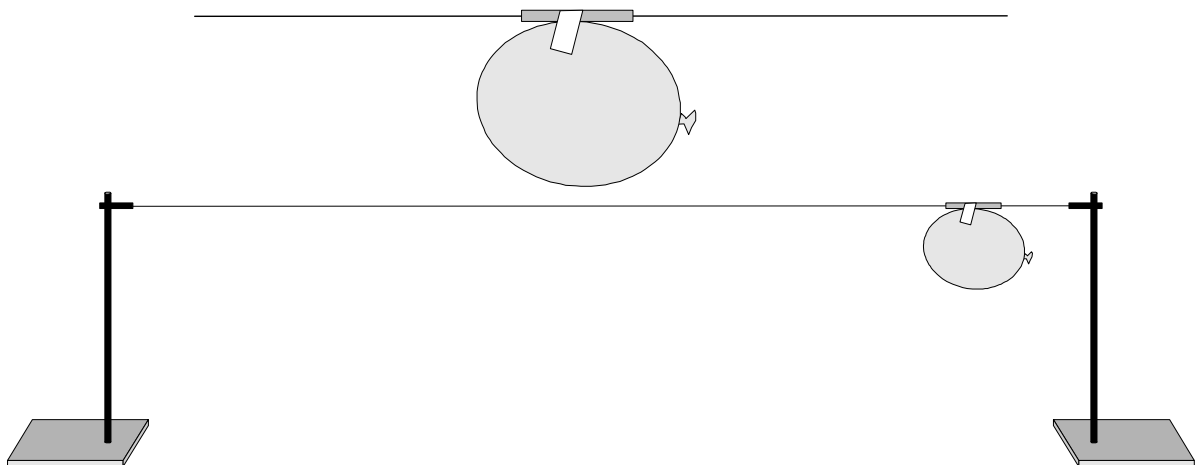
Versuchsaufbau (Materialliste)

Luftballon, Schere, Trinkhalm, Klebeband, einige Meter Zwirnsfaden (oder dünner, lackierter Kupferdraht $\varnothing$ 0,2 mm), 2 Stative mit Doppelmuffen (oder Hakenmuffen)

Versuchsdurchführung

Bei Aufbau und Durchführung des Versuches ist es vorteilhaft, Schüler mitwirken zu lassen.

- Zwei Stative mit Doppelmuffen werden in möglichst großem Abstand aufgebaut.
- Es wird ein ca. 5 cm langes Stück von einem Trinkhalm abgeschnitten und mittig auf einem ca. 5 – 7 cm langen Klebestreifen befestigt.
- Der Luftballon wird sehr stramm aufgeblasen (die Öffnung wird natürlich zugehalten) und der Klebestreifen mit dem Trinkhalmstück wird mittig auf seiner Oberseite befestigt.
- Der Zwirnsfaden wird an der Doppelmuffe (Hakenmuffe) des ersten Stativs befestigt.
- Das andere Ende des Zwirnsfadens wird durch das Trinkhalmstück am aufgeblasenen Ballon geschoben und dann an dem zweiten Stativ befestigt.
- Der Ballon wird zum zweiten Stativ hin gezogen und seine Öffnung wird dann freigegeben.



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung



Versuch 2

Versuchsthema

Warum eine Rakete fliegt

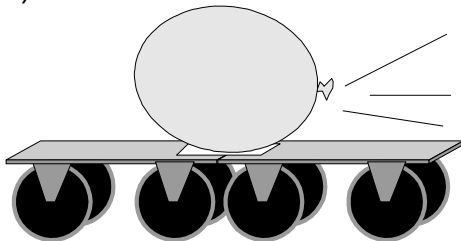
Versuchsaufbau (Materialliste)

2 Experimentierwagen, empfindlicher Kraftmesser, Luftballon, Schere, Klebeband, Teppichklebeband (Doppelklebeband)

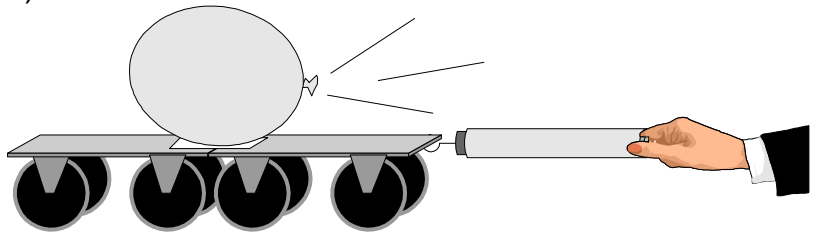
Versuchsdurchführung

- 2 Experimentierwagen werden mit Klebeband verbunden (ein Experimentierwagen hat bei diesem Versuch nicht genügend Stabilität und kippt daher leicht um).
- Es wird mittig ein Stück Doppelklebeband auf die Experimentierwagen geklebt.
- Der stramm aufgeblasene Ballon wird mit seiner Unterseite mittig auf den Klebestreifen des Experimentierwagens gedrückt und seine Öffnung wird dann freigegeben.
- Wie c), aber am hinteren Experimentierwagen wird ein Kraftmesser befestigt, der entweder mit der Hand gehalten oder an einer Hakenmuffe befestigt wird.

c)



d)



Versuchsbeobachtung

Versuchserklärung